

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Automatización de Sistema de Bombeo para Transferencia de Crudo en
el Campo Shushufindi Bloque 57

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previo la obtención del Título de:

Magister en Automatización y Control

Presentado por:

Víctor Emilio Cedeño Núñez

Julio Ernesto Gómez Assan

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

Esto logro va dedicado a Dios por ser mi guía, a mi amada esposa Paulina por su apoyo incondicional, su paciencia y amor por apoyarme siempre, sin ti no lo habría logrado mi amor.

A mi amado hijo Emilio Josué por ser quien alegra nuestros días y quien me acompaña durante esta meta

V. C.

A mi esposa Karina e hijos Julio y Nicole, que son el motor para seguir adelante, pese a las dificultades que se van presentando en el camino; a los ingenieros Giovanna Cordero y Wilmer Naranjo, colegas de la educación superior, que siempre han estado pendiente de mi crecimiento profesional.

J.G.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a la ESPOL, una institución que me abrió sus puertas y complementó mi formación, a cada uno de los docentes y al Ing. Richard Sánchez por su dedicación y enseñanzas, agradezco a toda mi familia por su apoyo incondicional.

V.C

A Dios que nos da fuerzas ante las adversidades; al Ing. Richard Sánchez Rosado que nos guió en la realización de esta tesis y a todos los profesores de la MACI 9 que supieron compartir sus conocimientos para nuestra formación profesional.

J.G.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Víctor Cedeño Núñez* y *Julio Gómez Assan* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Ing. Víctor Cedeño
Núñez

Ing. Julio Gómez Assan

COMITÉ EVALUADOR

Richard Michael Sánchez Rosado, Mgtr.

PROFESOR TUTOR

Ph.D. Dennys Paillacho Chiluiza

PROFESOR EVALUADOR

RESUMEN

En el bloque 57 ubicado en la provincia de Sucumbíos, en uno de sus sistemas de transferencia de crudo (SRF), se requiere reemplazar tres motores de combustión (MC) que han cumplido su vida útil por tres motores eléctricos (ME) y un motor de combustión nuevos, por lo tanto, se requiere realizar la automatización de este sistema de bombeo para transferir crudo utilizando controlador lógico programable e interfase hombre-máquina (HMI) y producir un sistema confiable, seguro y flexible.

Para esto se diseñó un programa para el controlador con RSLogix en escalera, para el SCADA se utilizó el Factory Talk View, para la creación de las pantallas. Al pie de máquina, se implementó un gabinete de control donde está un PLC y una pantalla HMI que se encarga del proceso correspondiente al MC, a una distancia de 330 m. se encuentra el otro gabinete con otro PLC y otra pantalla HMI que se encargan del control de los procesos de cada ME. Se estableció una red Modbus para leer los datos en las pantallas del SCADA del MC y de los ME y una red Ethernet.

Se crearon 730 tags en el programa, de los cuales, la gran mayoría son leídos por el SCADA para establecer el control y la configuración de las alarmas. Se crearon 18 pantallas, desde el menú principal hasta la configuración de la señal analógica de salida. Para el control PID encargado de los barriles por día, se estableció una constante K_p de 5.0, una constante K_i de 4.5.

Se logró cumplir con el objetivo planteado, automatizando el sistema de bombeo y transferencia de crudo conformado por tres ME y un MC, por medio de un control semi automático y centralizado, la red establecida es estrella, una red Modbus y una red Ethernet para poder guardar y ver datos en forma remota, desde la ciudad de Quito.

Palabras Clave: SCADA, Modbus, Ethernet, controlador lógico programable

ABSTRACT

In block 57 located in the province of Sucumbíos, in one of its crude oil transfer systems (SRF), it is necessary to replace three combustion engines (MC) that have completed their useful life with three electric motors (ME) and one engine. Therefore, it is required to automate this pumping system to transfer oil using programmable logic controller and human-machine interface (HMI) and produce a reliable, safe and flexible system.

For this, a program was designed for the controller with RSLogix in ladder, for the SCADA the Factory Talk View was used to create the screens. At the foot of the machine, a control cabinet was implemented where there is a PLC and an HMI screen that is in charge of the process corresponding to the MC, at a distance of 330 m. there is another cabinet with another PLC and another HMI screen that are responsible for the control of the processes of each ME. A Modbus network was established to read the data on the SCADA screens of the MC and ME and an Ethernet network.

730 tags were created in the program, of which the vast majority are read by the SCADA to establish the control and configuration of the alarms. 18 screens were created, from the main menu to the configuration of the analog output signal. For the PID control in charge of the barrels per day, a constant K_p of 5.0 was established, a constant K_i of 4.5. It was possible to meet the stated objective, automating the oil pumping and transfer system made up of three ME and one MC, through a semi-automatic and centralized control, the established network is star, a Modbus network and an Ethernet network to be able to save and view data remotely, from the city of Quito.

Keywords: SCADA, Modbus, Ethernet, programmable logic controller

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	6
ABREVIATURAS.....	12
SIMBOLOGÍA.....	14
ÍNDICE DE TABLAS.....	18
1. CAPÍTULO 1.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Descripción del problema.....	1
1.3 Justificación del problema.....	3
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 Objetivo General.....	4
1.4.2 Objetivos Específicos.....	4
1.5 Marco teórico.....	4
2. CAPÍTULO 2.....	9
2.1 Metodología.....	9
2.2 Sistema de bombeo horizontal HPS.....	10
2.3 Arquitectura de control.....	11
2.2.1 Topología.....	12
2.2.2 Diagrama de flujo de control.....	14
2.2.3 Tipo de control a aplicar.....	15
2.4 PLC y módulos de E/S.....	16
2.4.1 Controlador 1756-L72.....	16
2.4.2 Módulos E/S digitales.....	17
2.4.3 Módulos E/S analógicas.....	19
2.5 Tipos y estructuración de programación (LD).....	22
2.5.1 Tarea.....	22
2.5.2 Programas.....	23

2.5.3	Rutinas.....	23
2.5.4	Parámetros y tags locales.....	23
2.6	SCADA-HMI	23
2.6.1	SCADA	23
2.6.2	Factory Talk View Studio	23
2.6.3	Convenios de visualización del estado del sistema	24
2.6.4	Procedimientos para toma de decisiones.	25
2.6.5	Pantallas	26
2.7	Comunicaciones, red Ethernet/IP y Modbus	32
2.7.1	Red Ethernet.....	32
2.7.2	Red Modbus.....	33
2.7.3	Switch Stratix 5700-8000	35
2.8	Software	36
2.8.1	RSLogix 5000	36
2.8.2	RSLinx	36
2.9	Hardware.....	36
2.9.1	Motor combustión MC.....	36
2.9.2	Motor eléctrico ME	37
2.9.3	Bombas centrífugas multietapas.....	38
2.9.4	Cooler	38
2.9.5	Variador de velocidad	39
2.9.6	Transmisores y sensores de flujo	40
2.9.7	Transmisores y sensores de presión	40
2.9.8	Actuador y conversor	41
2.9.9	PanelView Plus	41
3.	CAPÍTULO 3.....	42
3.1	Resultados y análisis.....	42

3.2	Tags	42
3.3	Árbol generado por los módulos.....	42
3.4	Programa.....	43
3.4.1	E/S digitales y análogas (InputCopying)	45
3.4.2	Salidas digitales y analógicas (outputCopying).....	46
3.4.3	Escalamiento (Scale)	48
3.4.4	Control PID (pidValve)	48
3.4.5	Estado permisivo (CauseEffect).....	50
3.4.6	Totalizador (Totalizer) y Reset por área.....	50
3.5	Comunicaciones.....	51
3.5.1	Ethernet/IP	51
3.5.2	Modbus (comProsoft).....	52
3.6	Diseño SCADA.....	54
3.6.1	Pantallas Vista de MC y ME	55
3.6.2	Interlocks (Permisivo)	56
3.6.3	Datos Modbus.....	56
3.6.4	Menú de Inicio.....	57
3.6.5	Configuración de señal analógica.....	57
3.6.6	Arranque/Paro de Bomba	58
3.6.7	Configuración de la válvula PID	58
3.6.8	Arranque del Cooler.....	59
3.6.9	Pantalla de Bypass	59
3.7	PRESUPUESTO	59
4.	CAPÍTULO 4.....	61
4.1	Conclusiones Y Recomendaciones	61
4.1.1	Conclusiones	61
4.1.2	Recomendaciones	62

BIBLIOGRAFÍA.....	63
APÉNDICES.....	66

ABREVIATURAS

ARCH	Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
SRF	Shushufindi Receiver Facility
ITT	Ishpingo-Tambococha-Tiputini
EPF	Eden Process Facility
OCP	Oleoducto de crudo pesado
SCADA	Supervisión, Control y Adquisición de datos
PLC	Controlador lógico programable
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional
ANSI	Instituto Nacional Estadounidense de Estándares
ISA	Sociedad Internacional de automatización
HMI	Interface hombre-máquina
PID	Proporcional integral derivativo
AOI	Add on instruction
LD	Programación escalera
OPC	Comunicaciones plataforma abierta
JSR	Salto a subrutina
ST	Programación texto estructurado
PLC1	Controlador programable para los motores eléctricos
PLC2	Controlador programable para el motor de combustión
WAN	Red de área amplia
LAN	Red de área local
DI	Entrada digital
AI	Entrada analógica
PID	Proporcional integral derivativo
AO	Salida analógica
DO	Salida digital
PC	Computador personal
E/S	Entradas/Salidas
RTU	Unidad terminal remota
RIUP	Remover e insertar con voltaje
TIC	Comunicación y Tecnología de Información

VSD	Drive variador de velocidad
MT	Media tensión
IGBT	Transistor bipolar de compuerta aislada
PWM	Modulación por ancho de pulso
NA	Normalmente abierto
NC	Normalmente cerrado
VDC	Voltaje corriente directa
VAC	Voltaje corriente alterna
HPS	Sistema de bombeo horizontal
MC	Motor combustión
ME	Motor eléctrico
GC	Gabinete de control
M	Manual
A	Automático
P	Permisivo

SIMBOLOGÍA

kBBL	miles de barriles por día
HP	horse-power
NOx	Oxido de nitrógeno
CO	Oxido de carbono
mA	mili amperio
ms	mili segundo
bpd	barriles por día
w	vatio
V	voltios
Hz	Hertz
gal	galones
psi	libra fuerza por pulgada cuadrada

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa de bloques petroleros del Ecuador continental [1]	2
Figura 1.2. Motor combustión estacionario marca Caterpillar [Autores]	3
Figura 1.3. Configuración del sistema Scada [9]	6
Figura 1.4. Programa y sub rutinas [10]	7
Figura 2.1. Sistema SRF [Autores]	9
Figura 2.2. Plano del sistema HPS [Autores].....	10
Figura 2.3. Arquitectura implementada [Autores]	13
Figura 2.4. Topología de redes [13].....	14
Figura 2.5. Diagrama de flujo del control [Autores].....	15
Figura 2.6. Módulo controlador 1756-L72 [16].....	16
Figura 2.7. Módulo entradas digitales 1756-IB16 [17]	18
Figura 2.8. Módulo salidas digitales 1756-OB8 [17]	18
Figura 2.9. Módulo entradas analógicas 1756-IF16 y 1756-IF16K con conexión en modo diferencial [18]	19
Figura 2.10. Módulo salidas analógicas 1756-OF4 y 1756-OF4K [18]	21
Figura 2.11. Ambiente del RSLogix 5000, programa principal, tags y configuración de E/S [Autores]	22
Figura 2.12. Colores utilizados [Autores]	24
Figura 2.13. Desarrollo de la pantalla principal [Autores]	27
Figura 2.14. Barra de estado y navegación [Autores].....	28
Figura 2.15. Desarrollo de la pantalla de alarmas [Autores]	30
Figura 2.16. Reconocimiento de alarmas [Autores].....	30
Figura 2.17. Pantalla de Histórico de alarmas [Autores].....	31
Figura 2.18. Pantalla estado y arquitectura del PLC [Autores]	32
Figura 2.19. Módulo de comunicación 1756-EN2T [M], switch Stratix 8000 [19].....	32
Figura 2.20. Módulo de comunicación Modbus MVI56E-MCM [20].....	34
Figura 2.21. Switch industrial Stratix 5700-8000 [Autores]	35

Figura 2.22. Motor combustión Cummins [Autores].....	36
Figura 2.23. Motor eléctrico Siemens [Autores].....	37
Figura 2.24. Bombas centrífugas multietapas [22]	38
Figura 2.25. Sistema de lubricación Cooler [Autores].....	39
Figura 2.26. Diagrama de bloques del variador [Autores]	39
Figura 2.27. Sensores de flujo y su transmisor [Autores]	40
Figura 2.28. Sensores y Transmisores de presión [Autores]	40
Figura 2.29. Actuador y conversor [Autores]	41
Figura 2.30. PanelView Plus [25].....	41
Figura 3.1. Parte de tags declarados [Autores]	42
Figura 3.2. Árbol generado por los módulos instalados [Autores]	43
Figura 3.3. MainTask y MainProgram [Autores]	43
Figura 3.4. Salto a Subrutinas desde MainProgram [Autores].....	44
Figura 3.5. Configuración del MainTask [Autores].....	45
Figura 3.6. Entrada digital que indica MC funcionando [Autores]	45
Figura 3.7. Señal de entrada análoga, Presión de succión [Autores]	46
Figura 3.8. Salida digital que indica arranque/paro para el variador VSD PCF 1595 [Autores]	46
Figura 3.9. Diagrama de bloques del control PID [Autores].....	47
Figura 3.10. Salidas analógicas para control de velocidad de variadores [Autores].	47
Figura 3.11. Escalamiento de la señal del transmisor de flujo FIT_205F1 [Autores]	48
Figura 3.12. Bloque PID en el programa para la señal de salida análoga [Autores].	49
Figura 3.13. Manejo del Set Point, Producción diaria de crudo [Autores].....	49
Figura 3.14. Línea de programa donde se establece el estado permisivo [Autores]	50
Figura 3.15. Línea de programa con totalizador y Reset por área [Autores]	51
Figura 3.16. Características generales del módulo 1756-EN2T [Autores].....	52
Figura 3.17. Línea de programa para leer datos Modbus: Vibración de cámara de empuje y Bajo nivel de aceite Cooler [Autores].....	53

Figura 3.18. Líneas de programa para leer datos Modbus: Start y Total Run [Autores]	54
Figura 3.19. Configuración del módulo MVI56E-MCM [Autores]	54
Figura 3.20. Pantalla para el MC [Autores].....	55
Figura 3.21. Pantalla para los ME [Autores]	55
Figura 3.22. Pantalla del estado P [Autores]	56
Figura 3.23. Pantalla Modbus con variables del MC [Autores]	56
Figura 3.24. Pantalla de inicio Principal [Autores]	57
Figura 3.25. Pantalla de configuración señal analógica [Autores]	57
Figura 3.26. Pantalla de Arranque/Paro de Bomba [Autores].....	58
Figura 3.27. Pantalla de Configuración de válvula PID [Autores]	58
Figura 3.28. Pantalla de arranque de Cooler [Autores]	59
Figura 3.29. Pantalla de switch de presión en modo Normal y Bypass [Autores].....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Características de redes industriales [Autores]	11
Tabla 2.2. Lista de E/S analógicas [Autores].....	21
Tabla 3.1. Rutinas y descripción [Autores]	44
Tabla 3.2. Constantes K_p , K_i , K_d [Autores]	50
Tabla 3.3. Señales Modbus establecidas [Autores].....	53
Tabla 3.4. Presupuesto referencial para la automatización y SCADA [Autores].....	59

1.CAPÍTULO 1

1.1 Introducción

El proyecto realizado se concentra en cuatro capítulos, en el capítulo 1 se describe el problema con respecto a nuestro diseño de automatización, su justificación, el objetivo general y los específicos y en el marco teórico hacemos referencias a trabajos relacionados a nivel mundial. En el capítulo 2 se aborda la metodología utilizada para lograr el objetivo, la arquitectura utilizada, el tipo de control, el diseño de la programación, de las pantallas HMI y del SCADA establecido, las redes, el software y hardware utilizado. En el capítulo 3 se trata sobre los resultados obtenidos, con respecto al árbol del programa diseñado y sus rutinas, a los tags utilizados, las pantallas diseñadas, el escalamiento de señales analógicas y el control PID establecido. Para finalizar con el capítulo 4 donde están las conclusiones y recomendaciones.

1.2 Descripción del problema

En la Figura 1.1, se observa el bloque 57 llamado Shushufindi-Libertador [1], ubicado a 362 km de Quito, se extrae y también se recibe el petróleo para ser contabilizado por la Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero (ARCH), luego de esto se bombea hacia Lago Agrio según el requerimiento que se necesite, que actualmente es en promedio 346 kBBL [2].

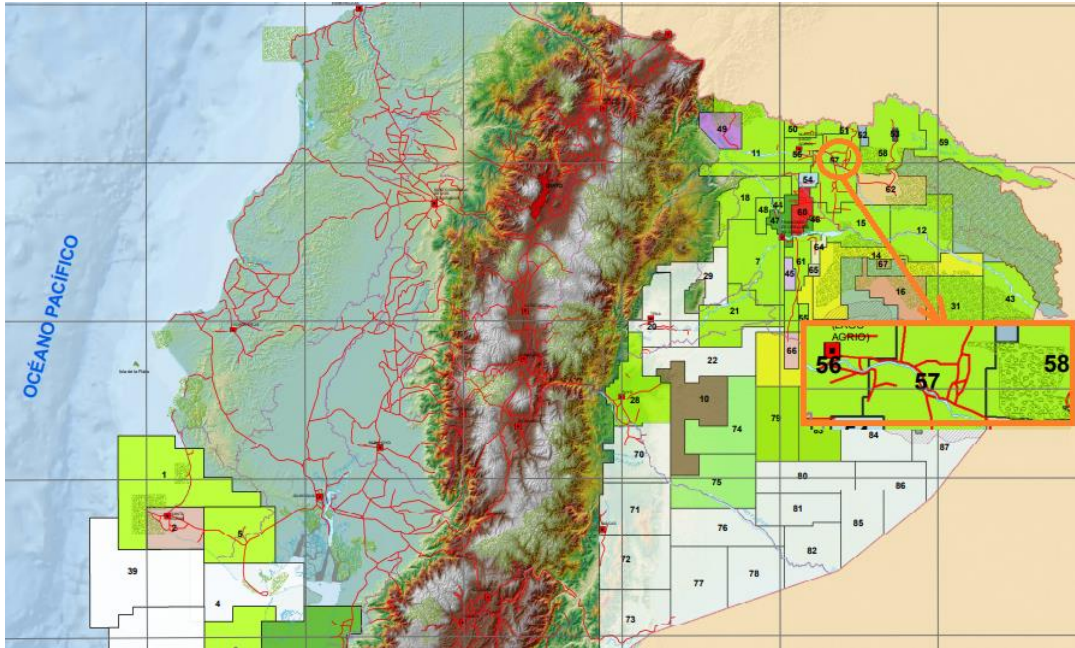


Figura 1.1. Mapa de bloques petroleros del Ecuador continental [1]

En este bloque ubicado en la provincia de Sucumbíos, que produce el 16% del total de la producción de crudo [3], tiene una estación llamada Shushufindi Receiver Facility (SRF), donde llega el petróleo desde varios lugares, tales como: Ishpingo-Tambococha-Tiputini (ITT), bloque 31, Eden Process Facility (EPF), Pañacocha, Central Process Facility (CPF). Para mejorar la calidad del crudo, una parte de la producción se une con la del bloque 51, para luego ser enviada por el Oleoducto de crudo pesado (OCP).

Actualmente el SRF posee bombas antiguas accionadas por un motor de combustión interna (MC) de 1500 HP estacionario, adquiridos en el año 1998, ver Figura 1.2. Su encendido y apagado se realiza en forma manual por medio de un operador y un sistema de Supervisión, Control y Adquisición de datos (SCADA), se cuenta con un monitoreo constante de sus variables tales como la vibración y temperatura de la bomba, las cuales si alcanzan niveles no adecuados, puede producir daños irreversibles y costosos, pudiendo detenerse incluso el bombeo hacia Lago Agrio, deteniendo la producción y generando pérdidas económicas.



Figura 1.2. Motor combustión estacionario marca Caterpillar [Autores]

La empresa ha propuesto el montaje de un nuevo sistema de bombeo, conformado por tres unidades con motores eléctricos y una unidad de motor de combustión para garantizar la continuidad de envío de crudo hacia Lago Agrio.

1.3 Justificación del problema

Los motores que se van a reemplazar, están funcionando desde el año 1998. La vida útil de un motor de combustión interna está alrededor de las 120000 horas de funcionamiento, lo que representan 13,6 años [4], por lo tanto, la empresa nacional ha decidido que es hora de reemplazarlos, para tener un sistema más robusto y confiable.

Así mismo, se hace necesario cambiar estos motores antiguos porque producen contaminación al medio ambiente. Un motor de la potencia indicada, después de realizar las conversiones adecuadas, aproximadamente emite hacia el medio ambiente 507 kg de Nox y 109 kg de CO, al día [5].

Tres motores de combustión interna serán reemplazados por motores eléctricos, los cuales requieren ser automatizados desde que entran en funcionamiento después del arranque como en la parada, cuando ha cumplido su cuota de

bombeo o cuando se presenta alguna falla, así como monitorear sus principales parámetros como voltaje, corriente y frecuencia. Así mismo, entrará en funcionamiento un nuevo motor de combustión marca Cummins. En cuanto a la bomba se requiere un monitoreo de variables como vibración y temperatura.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Automatizar el sistema de bombeo para transferencia de crudo utilizando Controlador Lógico Programable (PLC) e Interfaz Hombre-Máquina (HMI) para evitar pérdidas económicas por falta de bombeo y producir un sistema confiable, seguro y flexible.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Diseñar la programación del PLC para la automatización de sistema de bombeo mediante el lenguaje de programación tipo Ladder.
2. Presentar las especificaciones para la configuración del sistema de control, características del hardware, recursos y tareas de la estación de bombeo en Shushufindi utilizando la norma IEC 61131
3. Desarrollar la interfaz gráfica para supervisión y control del operador HMI utilizando las normas y los estándares ANSI/ISA S5.1-SP e IEC 60617.
4. Establecer la comunicación entre PLC – HMI utilizando el protocolo Ethernet Industrial.

1.5 Marco teórico

En Perú [6], se realizó un diseño para la automatización utilizando un enlace para conectarse con la red SCADA de Petroperú con el objetivo de controlar en forma automática dos motobombas que funcionan en paralelo, en la estación Andoas para transportar el crudo hacia el Oleoducto Norperuano y no exista variación de presiones.

En dicha estación, utilizaron motobombas del tipo tornillo, controladas en forma manual/local, controlan su velocidad para obtener la presión deseada tanto en la carga como en la descarga del crudo, esta variable más las lecturas de los instrumentos de campo llegarán a un PLC Control Logix serie 5000 de la marca Allen Bradley, mediante señales de 4-20 mA. Se utilizó el protocolo Modbus RTU con cable par trenzado a puertos RS-485. En el nivel de supervisión se utiliza un switch y el protocolo Ethernet/IP.

En un trabajo [7], indican que con un sistema SCADA, se puede monitorear en tiempo real, todos los cambios que sufren las variables en los sistemas de bombeo, tanto en la extracción como en el transporte. En el mercado mundial, los SCADA más conocidos son: Factory Link y Genesis (EE.UU), Sitex (Inglaterra), TraceMode (Rusia) y SIMATICWinCC (Alemania), los cuales, junto a la telemecánica y PLC, hacen posible que los sistemas de bombeo sean confiables y flexibles.

En una aplicación donde se almacena petróleo [8], se necesita implementar un sistema SCADA cuyas ventajas son: mejorar la productividad, reducir costos, identificar en forma rápida condiciones de falla, mejorar la eficiencia y la seguridad. Su función principal es monitorear y controlar diferentes dispositivos de campo a través de una HMI, verificar condiciones de funcionamiento, arranque y parada del sistema de bombeo. Los dispositivos de campo pueden ser medidores de nivel, transmisores de presión y temperatura, caudalímetros, medición de energía y consumo.

El SCADA deber trabajar en conjunto con el PLC cuya función es realizar el control interno por medio de instrucciones y funciones con determinada secuencia lógica, utiliza también temporizadores, para controlar diferentes tipos de dispositivos de proceso que ingresan a los módulos de entradas/salidas digitales y analógicas.

En un trabajo de simulación [9] señalan que los sistemas SCADA pueden supervisar el funcionamiento de los equipos de campo, su principal función es la recopilación de datos, control de equipos, detectar anomalías, ajustar parámetros, consultar señales de alarma y datos históricos. En el transporte de petróleo, las

variables de temperatura, presión y flujo son controladas por bombas y válvulas eléctricas. Se realizó una simulación de la operación de un oleoducto, donde después del almacenamiento pasará por un circuito cerrado por medio de una bomba experimental. El experimento abarca pruebas de apagado y reinicio y de detección de fugas.

Se utilizan PLC de la marca Allen Bradley, uno principal y otro redundante, su montaje es flexible, de fácil configuración, confiable y expandible, programados con el RSLogix 5000, con un programa principal, inicialización, reinicio, alarma, visualización, procesamiento de datos y nueve procesos experimentales, todo esto por medio de 42 subprogramas. Se establece una red ControlNet para el intercambio de datos, en la arquitectura del SCADA, la computadora superior puede compartir datos entre los departamentos de administración a través de Ethernet. Las pantallas para el HMI se realizan por medio del software Citect de Schneider Electric, la estación de operación se puede modificar en línea y se establece un control local y remoto, se completan más de 50 pantallas, se crea la base de datos en Excel. En este trabajo, la configuración del sistema Scada se muestra en la Figura 1.3

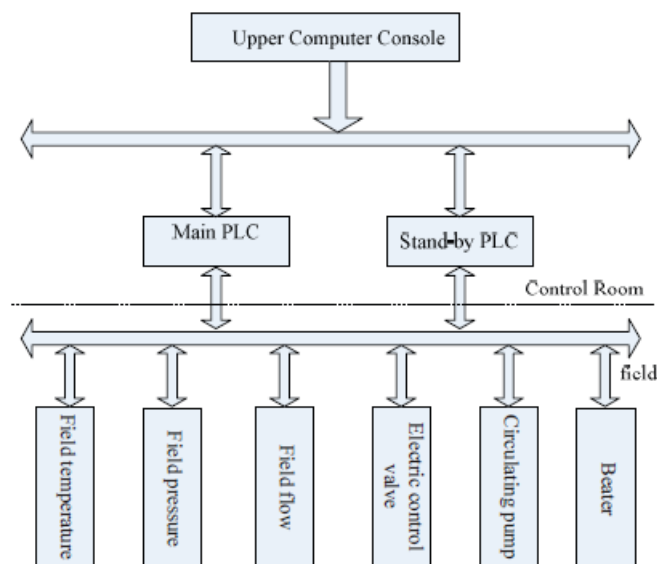


Figura 1.3. Configuración del sistema Scada [9]

Para la red, se utilizan cuatro módulos de comunicación 1756-CNBR para red ControlNet y una tarjeta 1784-PCIC, que intercambian datos entre la estación de operación y el PLC. Se utilizaron 320 entradas y salidas digitales, también entradas y salida analógicas, se establecieron tres controles PID para válvulas.

En otro artículo, presentaron una propuesta para obtener menos memoria de procesador del PLC y un tiempo de ejecución del programa creado en Add On Instruction (AOI), comparado con un diagrama de escalera convencional [10]. Utilizaron las herramientas de Rockwell Automation como el RSLogix Emulate 5000 que trabaja junto al Studio 5000 Logix, para la simulación. Para las comunicaciones el RSLinx y para el diseño de las pantallas, el FactoryTalk View Studio. El PLC se programó para enviar todas las lecturas a las interfaces gráficas.

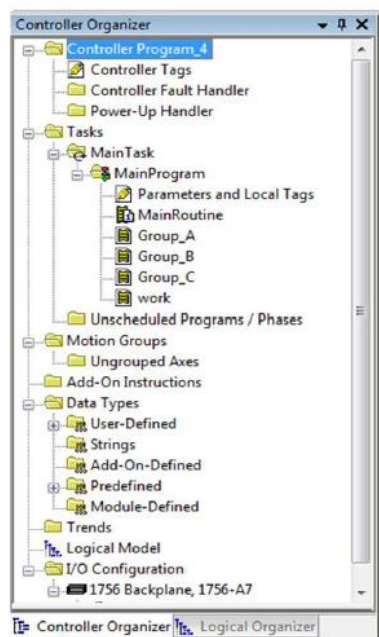


Figura 1.4. Programa y sub rutinas [10]

Proponen un oleoducto automatizado a través de un sistema PLC-SCADA por medio de dos métodos, mediante instrucciones AOI y luego por medio del lenguaje tipo escalera (LD). El petróleo se almacena en tres tanques A, B y C para luego ser enviado hacia los buques cisternas. El control de cada tanque es igual, para llenar los tanques se utiliza una válvula múltiple que se activa manualmente desde

el HMI, así mismo, poseen sensores para medir su nivel. Para la descarga, existe una válvula que también se opera manualmente desde el HMI. Para la carga, se considera una bomba que se controla en modo manual como semiautomático. En la secuencia de inicio, las válvulas de carga y descarga se abren automáticamente, luego la bomba arranca automáticamente, en la secuencia de parada, primero se detiene la bomba, luego las válvulas se cierran automáticamente.

Se crea un programa principal con sus subrutinas, ver Figura 1.4, utilizando la instrucción salto a subrutina (JSR). Las instrucciones AOI son funciones creadas por el programador lógico y se requiere una buena experiencia en programación de PLC. El servidor de datos y el servidor HMI están conectados a través del Open Platform Communications (OPC), el cual proporciona estándares para que software y hardware de diversos proveedores puedan comunicarse entre sí.

Utilizaron el estándar IEC61131 y lograron demostrar mediante la simulación, la disminución de la longitud del programa en 45000 bytes aproximadamente y el ciclo de ejecución del programa en 0,248 ms.

El estándar 61131 fue publicado en el año 1993 y desde ahí, la mayoría de fabricantes de PLC tienen sistemas que son compatibles en algunos aspectos con dicho estándar. En sistemas donde la seguridad es primordial, como la industria nuclear o petrolera, se requiere una alta integridad y arquitecturas redundantes, donde los PLCs son programados usando el estándar indicado con lenguajes gráficos y de texto. Realizaron una investigación donde utilizaron el software TriStation, cortesía de Triconex Engineering, de Schneider Electric, donde se creó un simple programa para PLC escrito en el lenguaje LD de la IEC 61131-3 para luego convertirlo a lenguaje de texto estructurado (ST). El ST obtenido a partir del LD fue analizado por medio de la herramienta Malpas [11].

El Malpas es una herramienta de análisis disponible para analizar la integridad y funcionalidad de los lenguajes de alto y bajo nivel y la seguridad de sistemas en aplicaciones como la protección de reactores nucleares. Es capaz de analizar problemas como divisiones para cero, variables sin inicializar y estructuras de lazos incorrectos.

2. CAPÍTULO 2

2.1 Metodología

El nombre de nuestro sistema es PLC-205F. Para este proyecto se realizaron varios puntos para poder cumplir con los objetivos específicos, éstos son:

- Arquitectura de control
- Elección del PLC según el número de entradas y salida
- Elección del tipo de programación del PLC
- Diseño del SCADA
- Establecimiento de comunicaciones
- Recursos de software y hardware utilizado

El sistema SRF donde se realizó el proyecto consta de un MC y tres motores eléctricos (ME), cada uno de ellos posee su respectivo Sistema horizontal de bombeo (HPS), el MC posee su gabinete de control 1 (GC1) donde se aloja el controlador PLC, módulos, PanelView y demás elementos, en el cuarto del operador se encuentra el gabinete de control 2 (GC2) donde se aloja el otro PLC, módulos y PanelView. La distancia del SRF al cuarto del operador es de 330 m. Ver Figura 2.1.

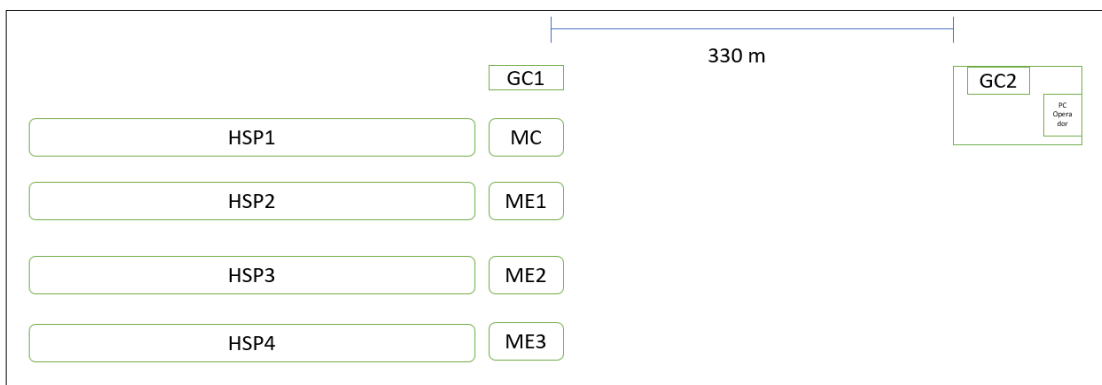


Figura 2.1. Sistema SRF [Autores]

2.2 Sistema de bombeo horizontal HPS

El sistema HPS, que consta de manera general de un motor de combustión o eléctrico de potencia hasta 2500 HP, cámara de empuje, bombas centrífugas en multietapas, tuberías de carga y descarga, cooler, transmisores y actuador [12].

Las principales características son:

- Presión de descarga hasta 6650 psi
- Caudales: 40 hasta 1850 gal/min

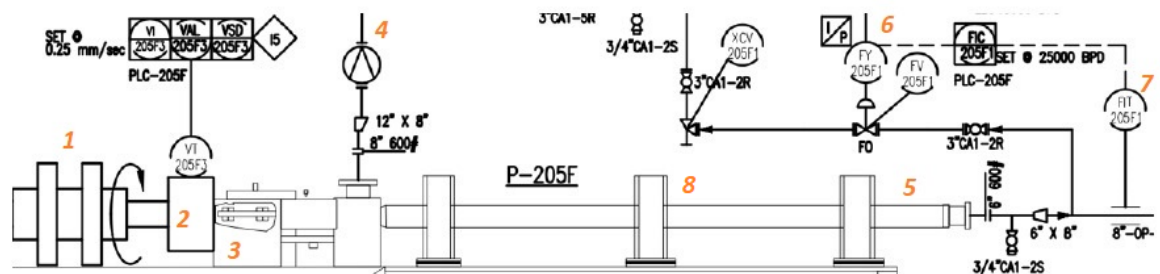


Figura 2.2. Plano del sistema HPS [Autores]

En la Figura 2.2 observamos:

1. Motor
2. Cámara de empuje
3. Cooler
4. Tubería de carga
5. Tubería de descarga
6. Actuador
7. Transmisor de flujo
8. Bombas centrífugas

La capacidad de transferencia de bombeo entre el MC y los tres ME es de 600000 bpd, de los cuales, 100000 bpd corresponden a la capacidad del MC.

2.3 Arquitectura de control

Se utilizó el protocolo Modbus Maestro-esclavo debido a que es el utilizado en la empresa, por su fácil implementación, al manejo de bloque de datos y a su comunicación con cualquier topología de red. La distancia entre el sistema de bombeo y la PC del operador es de 330 m. aproximadamente, con lo cual, si se cumple con esta característica en donde la distancia máxima permitida entre nodos es de 350 m [13].

En la industria del petróleo y el gas, el protocolo más utilizado es el Modbus, debido a que es compatible para que funcione con cualquier sistema de comunicaciones patentado. El retraso de máquina conectada a Modbus a sus clientes se considera insignificante. En términos de velocidad, un tiempo de ciclo típico oscilaría entre 200 ms y aproximadamente 1 segundo [14].

Tabla 2.1. Características de redes industriales [Autores]

Red	Topología	Dirección	Distancia	Velocidad	Tamaño
ControlNet	bus-estrella	99	250-1000 m cable; 3-30 km fibra	5 Mbps	0-510 bytes
Ethernet	bus-estrella	1024	100 m par trenzado; 400m-50 km fibra	10-1000 Gbps	46-1500 bytes
Devicenet	bus	64	500 m	125-500 Kbps	8 bytes
Modbus	bus-estrella	250	350 m	300bps-38.4 Kbps	0-254 bytes
Profibus	bus-estrella-anillo	126	100-1900 m	9.6 Kbps-12 Mbps	0-244 bytes

En la tabla 2.1 se muestran las características de ciertas redes industriales, entre ellas la Modbus y Ethernet, utilizadas en este proyecto.

En la figura 2.3 se indica la arquitectura implementada. A nivel de campo están las entradas digitales para los switches de presión, flujo y temperatura, pulsadores de arranque y paros de emergencia, selector para elegir el control local o remoto, contactos secos para determinar el estado del motor. Para las salidas digitales, se

consideró, luces piloto para determinar el estado del motor (apagado o encendido) y contactos que van hacia el variador de velocidad para poder subir o bajar la velocidad del motor. La comunicación entre los variadores de velocidad y el PLC se realiza por medio de la red Modbus con el estándar RS-485.

En cuanto a las entradas analógicas, todas trabajan con señales de 4-20 mA, sirven para controlar variables en la bomba como: alta y baja presión de descarga, baja presión en la succión, alta vibración en la cámara de empuje y flujo. Se consideró una salida analógica, de 4-20 mA y sirve para controlar la apertura o cierre de la válvula.

En el nivel de control, lo integran dos PLC, sus módulos de E/S y de comunicación. Tanto los PLC como el HMI, se conectan a un switch. Un PLC es para el control de los motores eléctricos y el otro es para el control del motor de combustión que queda de respaldo para reemplazar a cualquier motor eléctrico.

En el nivel de supervisión, se establece una red WAN, conformada por la PC operador, donde trabaja el SCADA y tres servidores, uno para el Factory Talk View, otro para el Factory Talk Historian y por último, para el Factory Talk Link.

2.2.1 Topología

En el campo, donde se encuentra nuestro sistema, se estableció una red LAN con protocolo Ethernet/IP, la topología utilizada es tipo estrella, donde el PLC1 está configurado como maestro. Este tipo de topología, es muy popular para redes pequeñas. La ventaja de esta configuración es su flexibilidad debido a que se pueden añadir nuevos periféricos como sensores y HMI. Un inconveniente sería que ante un daño del PLC maestro, causaría la parada del sistema.

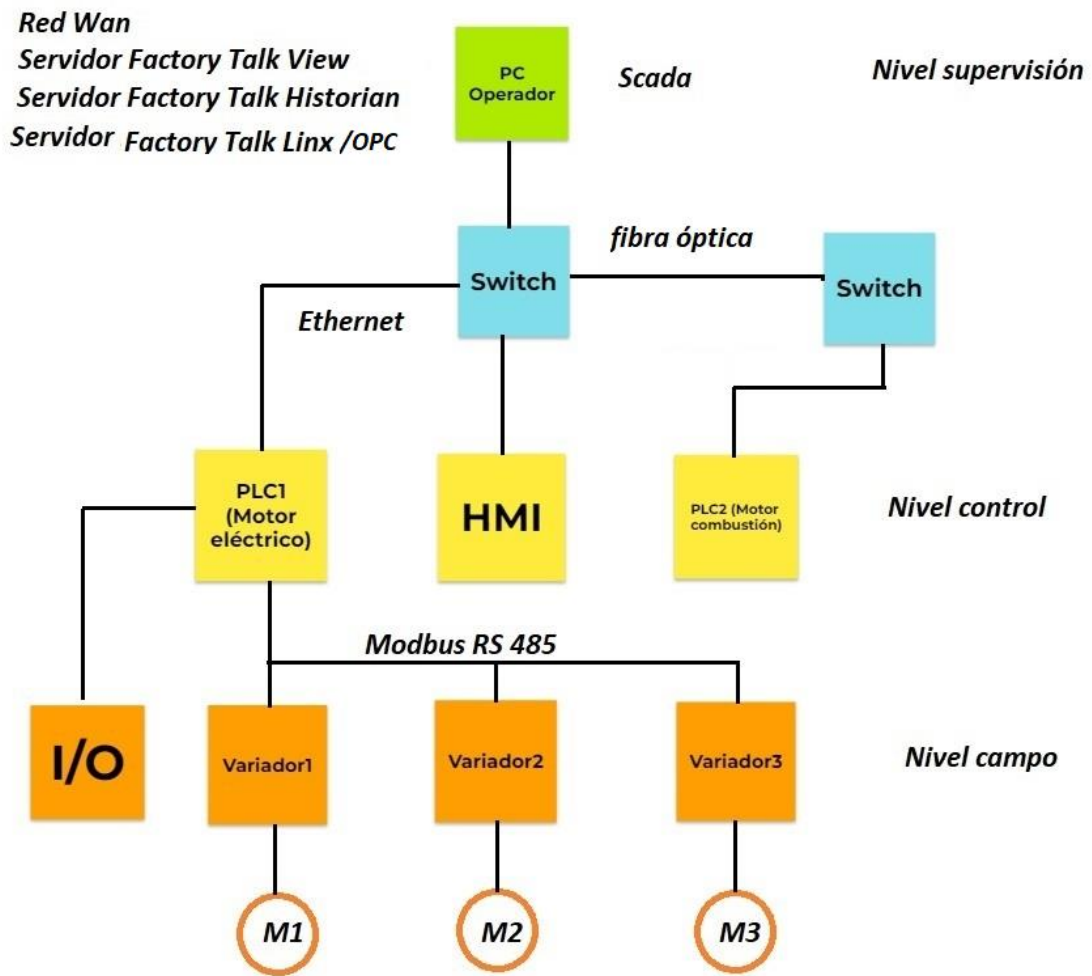


Figura 2.3. Arquitectura implementada [Autores]

Otra ventaja es que se puede predecir su rendimiento, que para aplicaciones críticas es muy importante [13]. En la figura 2.4 se observan las diferentes topologías de redes.

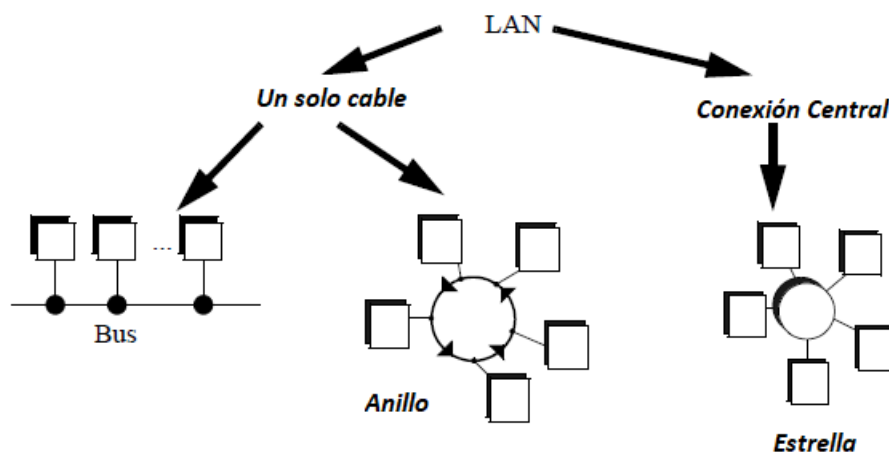


Figura 2.4. Topología de redes [13]

2.2.2 Diagrama de flujo de control

Con respecto a la lógica de control, que sirvió de base para el diseño del programa de automatización, en primera instancia, se verifica el estado permisivo (P) para el arranque de la bomba, este estado depende de lo que se desee controlar y automatizar, es decir, según el proceso.

Las siguientes entradas digitales (DI) y entradas analógicas (AI), son verificadas:

- Baja presión de succión (DI y AI)
- Bajo flujo de succión (DI)
- Alta y Baja presión de descarga (AI)
- Vibración en bomba (AI)
- Paros de emergencia (DI)

De no existir ninguna variable que impida el arranque de la bomba, entra a funcionar un temporizador, seteado en 50 segundos, cumplido el tiempo, se establece el flujo deseado que está en relación directa con los requerimientos de la producción en bpd.

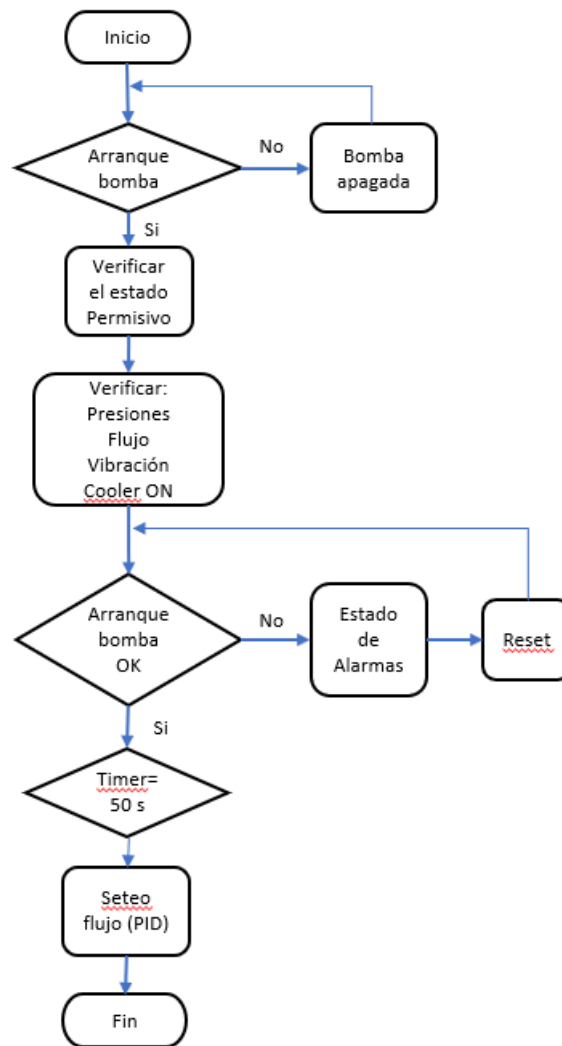


Figura 2.5. Diagrama de flujo del control [Autores]

Si no se logra el estado de Arranque de bomba OK, entonces el control ingresa al estado de las alarmas, para proceder a su reconocimiento, por parte del operador, luego de esto, se realiza un Reset.

Como parte de las salidas del proceso, se activa la válvula por medio de un control PID, esta salida es del tipo AO. Otra variable constantemente medida, es el flujo, se trata de una entrada AI. En la Figura 2.5 se muestra el diagrama de flujo del control.

2.2.3 Tipo de control a aplicar

El tipo de arquitectura de control es la centralizada, donde existirá un PLC para el control de todo el proceso, un HMI ubicada en campo donde se

realizará la visualización y control y una PC Operador ubicada en cuarto de máquinas.

El tipo de control estandarizado para este proceso es semiautomático, donde a partir de los requerimientos de producción, el operador realiza el arranque manual (15) del motor nuevo de combustión.

El tipo de control es local y remoto. Local porque el arranque se puede realizar en el campo, a pie de máquina, por medio del HMI y remoto donde el mando queda a cargo de la PC del operador.

2.4 PLC y módulos de E/S

2.4.1 Controlador 1756-L72

Para el proyecto se eligió el PLC modelo 1756-L72, ver Figura 2.6, que trabaja como un controlador autónomo con los módulos de E/S y es el maestro. Para su programación se necesita el software RSLogix 5000 y para establecer comunicación el RSLinx.

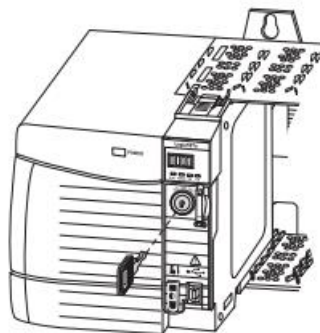


Figura 2.6. Módulo controlador 1756-L72 [16]

El controlador tiene una llave en su parte frontal, donde se puede elegir su modo de funcionamiento: Marcha (RUN), Remoto (REM) y Programación (PROG). Para nuestro caso, estará en RUN o REM. En modo REM generalmente se lo utiliza para la puesta en servicio y para un acceso temporal para editar el programa en línea.

Las principales características del PLC utilizado son:

- Máximo 500 conexiones del controlador
- Comunicación con Ethernet/IP, ControlNet y E/S remotas
- Memoria para datos y lógicas de 4 MB
- Memoria de 0,98 MB para E/S
- Tarjeta SD para memoria de respaldo

En un sistema tradicional de E/S, los controladores van preguntando a los módulos para obtener los estados de sus entradas. En el sistema ControlLogix, los módulos E/S van difundiendo sus datos al ocurrir un cambio de estado o en cada intervalo de tiempo solicitado entre paquetes.

2.4.2 Módulos E/S digitales

Para configurar los módulos E/S se necesita el software RSLogix 5000 y empiezan a funcionar apenas se descargan los datos de configuración, con estos datos, el controlador establece conexión directa con cada uno de los módulos, a los que hace referencia los datos. De forma periódica, el controlador comprueba la presencia de un módulo en su respectiva ranura. Cualquier interrupción en la conexión hace que el controlador ponga en 1 los bits del estado de fallo en el área asociada al módulo.

En la Figura 2.7, se observa en la parte derecha, el esquema de conexiones del módulo 1756-IB16 utilizado en el proyecto, en la parte izquierda se encuentra las conexiones internas, destacando que cada entrada es optoacoplada. Este módulo puede trabajar con voltajes de 10 hasta 31.2 VDC. Posee 16 entradas.

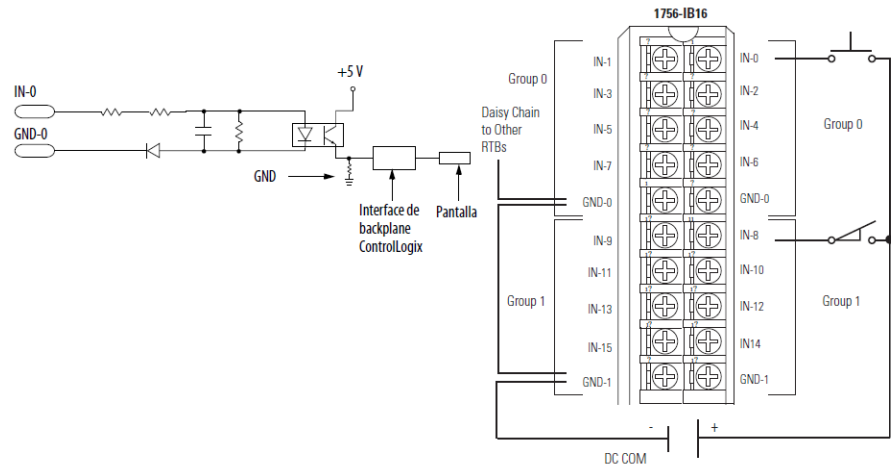


Figura 2.7. Módulo entradas digitales 1756-IB16 [17]

Para las salidas digitales se utiliza el módulo 1756-OB8, ver Figura 2.8, posee 8 salidas de tipo Mosfet tipo p, cada salida trabaja de 10 a 30 VDC, aunque se puede instalar relés para poder trabajar con diferentes voltajes.

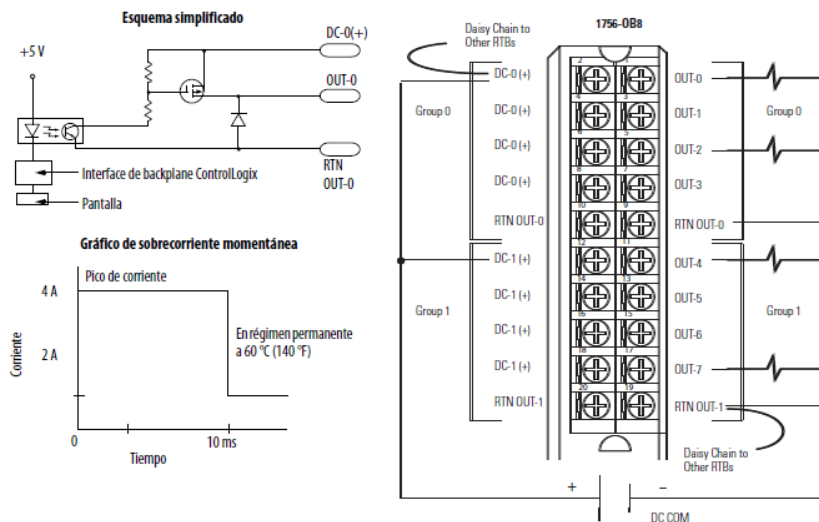


Figura 2.8. Módulo salidas digitales 1756-OB8 [17]

Cabe indicar que este módulo no posee fusibles internos de protección para las salidas, por lo que se hizo necesario instalar relés en cada salida, para protegerlas. Así mismo, cuando el controlador activa una salida,

internamente se encuentra aislada del exterior por medio del optoacoplador.

En el Anexo A, se observa el listado de la E/S digitales, sus módulos, el tag utilizado, descripción y servicio. Los tags definidos en el programa del PLC son leídos por el SCADA, inclusive podríamos exportarlos a un OPC server para leerlos en un SCADA diferente a los de Rockwell Automation.

2.4.3 Módulos E/S analógicas

En el proceso se utilizan variables analógicas, por lo tanto, es necesario el uso de módulos para este fin, el 1756-IF16 para las entradas, y el 1756-OF4 para las salidas.

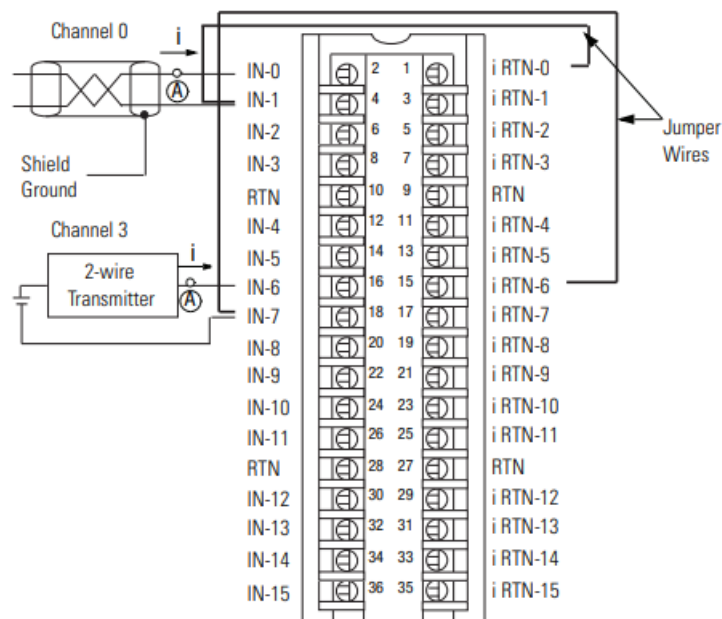


Figura 2.9. Módulo entradas analógicas 1756-IF16 y 1756-IF16K con conexión en modo diferencial [18]

En la Figura 2.9 se observa el módulo utilizado con conexión en modo diferencial. Para nuestro proyecto utilizamos el modo single ended.

Las principales características de este módulo son:

- Conexiones de las entradas: modo single ended, diferencial (2 cables) y diferencial (4 cables, para alta velocidad)
- Voltaje en el chasis de montaje: 5V DC y 24 V DC
- Tiempo de detección de circuito abierto: Max. 5 s
- Máxima protección de sobrevoltaje: 30 V DC
- Tiempo mínimo de registro de la entrada: para single ended, 488 ms, para el diferencial de dos cables, 244 ms y para el diferencial de 4 cables, 122 ms.
- Voltaje de aislamiento: 250 V continuos
- Calibre del cable: 22 hasta 14 AWG

En nuestro proceso, utilizamos una salida analógica para controlar la válvula del flujo de crudo, por medio del módulo 1756-OF4 y una señal de 4-20 mA. En la Figura 2.10 se observa dicho módulo, consta de cuatro salidas analógicas, de las cuales ocuparemos una.

Las principales características de este módulo son:

- Tiempo de escaneo: 12 ms para punto flotante, 8 ms para entero
- Tiempo de asentamiento (settling time): < 2 ms al 95% del valor final
- Intervalo de calibración: 12 meses
- Voltaje en el chasis de montaje: 5V DC y 24 V DC
- Voltaje de aislamiento: 250 V continuos

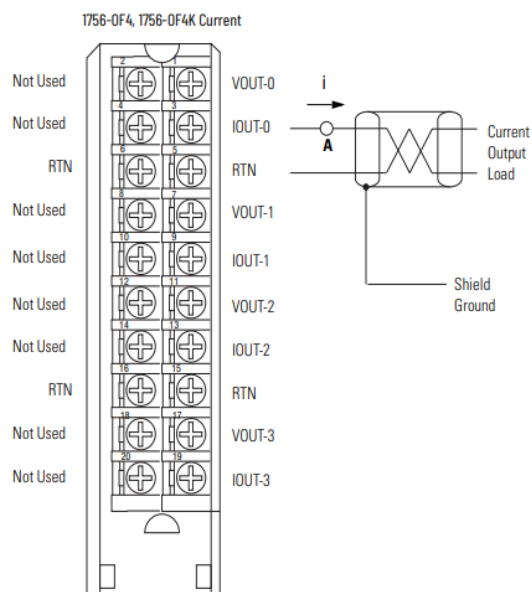


Figura 2.10. Módulo salidas analógicas 1756-OF4 y 1756-OF4K [18]

En la Tabla 2.2 se indican las entradas y salidas analógicas, su respectivo tag y el canal asignado. Los nombres de los tags son del tipo local, propios del sistema PLC-205F, no existirán nombre de tags repetidos, debido a que corresponden a otros sistemas.

Tabla 2.2. Lista de E/S analógicas [Autores]

CANAL	TAG DE PLC	DESCRIPCION EQUIPO	SERVICIO	TIPO DE E/S	TIPO DE SEÑAL	Módulo
0	PIT_205F2A	TRANSMISOR INDICADOR DE PRESIÓN	Alta presión en descarga de la bomba	AI	4-20mA	1756-IF16
1	PIT_205F2B	TRANSMISOR INDICADOR DE PRESIÓN	Baja presión en descarga de la bomba	AI	4-20mA	1756-IF16
2	PIT_205F1	TRANSMISOR INDICADOR DE PRESIÓN	Baja presión en succión de la bomba	AI	4-20mA	1756-IF16
5	VT_205F3	TRANSMISOR DE VIBRACION	Alta vibración en cámara empuje	AI	4-20mA	1756-IF16
0	FY_205F1	VALVULA DE CONTROL/CO NVERSOR IP	Apertura de válvula PID	AO	4-20mA	1756-OF4

2.5 Tipos y estructuración de programación (LD)

Nuestro sistema requiere un control que incluya: tareas, programas, rutinas y tag locales. Los controladores Logix5000 permiten usar varias tareas para programar y en la configuración, se puede elegir la prioridad. Considerar que el controlador puede ejecutar solo una tarea a la vez y cada una de ellas, puede tener varios programas, sin embargo, sólo un programa se ejecuta a la vez.

2.5.1 Tarea

Existe una tarea elegida como continua para el control de nuestro proceso, se ejecuta constantemente, al final del escan, se reinicia inmediatamente. El controlador ControlLogix acepta hasta 32 tareas, de las cuales sólo una puede ser continua. Una tarea puede tener hasta 1000 programas y proporcionan información de programación y priorización de uno o más programas. En la Figura 2.11 se observa el ordenamiento de las tareas, programas y tags locales.

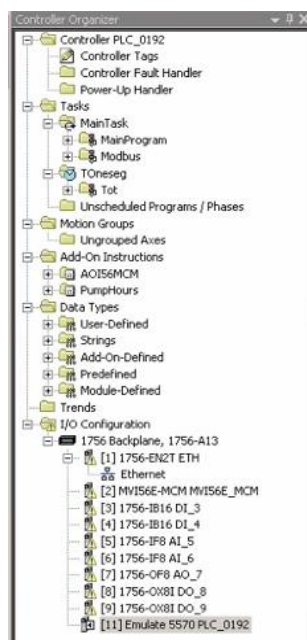


Figura 2.11. Ambiente del RSLogix 5000, programa principal, tags y configuración de E/S

[Autores]

2.5.2 Programas

Los programas, dentro de una tarea, se priorizan y sirven para agrupar datos y contienen: tags locales, parámetros y rutinas. Para el proyecto, se definió un solo programa principal.

2.5.3 Rutinas

Una rutina es un conjunto de instrucciones escrito en un solo lenguaje de programación, para nuestro caso, tipo LD, que proporcionan el código ejecutable para el proyecto en el controlador. Cada programa tiene una rutina principal.

2.5.4 Parámetros y tags locales

Con cada controlador Logix5000 se utilizan tags (nombre alfanumérico) para poder manejar los datos (variables) y no tienen un formato fijo. Sirven para identificar los datos y permiten organizarlos y documentar el proceso o aplicación. Para nuestro caso, unas partes de los tags utilizados están en el Apéndice A y en la Tabla 2.2.

2.6 SCADA-HMI

2.6.1 SCADA

El SCADA sólo se ha desarrollado en el SRF, oficinas de Quito tienen opción de visualizar datos por medio del OPC y los tags declarados. Esta visualización se realiza por medio de enlace de datos.

2.6.2 Factory Talk View Studio

El software Factory Talk View Studio sirvió para el desarrollo de las interfaces HMI de nuestro proceso.

2.6.3 Convenios de visualización del estado del sistema

Con el fin de facilitar la visualización tanto de los elementos del sistema, como del estado general del sistema, el sistema de control y monitoreo cuenta con varios estándares con respecto a la navegación, señalización y distribución de las pantallas de la aplicación. La norma aplicada es ISA 5.1 hasta ISA 5.5.

En la Figura 2.12, se muestran los convenios estipulados para la visualización de elementos del proceso son:

Color Verde: Elemento activado, Operación Normal

Color Gris: Elemento desactivado

Color Amarillo: Advertencia, alarma alto o bajo reconocido

Color Naranja: Indicación de FirstOut, Primera alarma reconocida

Color Rojo: Alarma de alto – alto y bajo – bajo reconocido, estado cerrado

Color Magenta: Bypass status

Color Rojo-Negro: Alarma alto - alto y bajo – bajo No reconocida

Color Amarillo-Negro: Alarma alto y bajo No reconocida

Color Naranja-Negro: Indicación de FirstOut, Primera alarma No reconocida



Figura 2.12. Colores utilizados [Autores]

2.6.4 Procedimientos para toma de decisiones.

Dentro del Sistema de Control y Monitoreo, de acuerdo al tipo de acción que ejecute el operador, existen tres tipos de decisiones adoptadas:

- Decisiones de Navegación,
- Decisiones de Comando,
- Decisiones de Proceso.

Las **Decisiones de Navegación** no son más que las diferentes acciones que toma el operador para cambiar de una de las pantallas de operación a otra, siendo exclusivas de la barra inferior de navegación del sistema. Para la toma de una decisión de esta naturaleza, no hace falta más que presionar sobre el botón para ir a la pantalla que se desee navegar. Este tipo de decisiones son de carácter general y se encuentran presentes a lo largo de todo el sistema.

Las **Decisiones de Comando**, son todas aquellas que involucren algún tipo de acción. Es decir, las decisiones de comando son todas aquellas que no están directamente relacionadas con el proceso. De forma general, para realizarlas no hace falta más que llevar a cabo simples pulsos sobre los botones que tengan la leyenda del comando que se quiera realizar como por ejemplo el Reset de fallas.

Las **Decisiones de Proceso** son todas aquellas que intervienen directamente con el proceso en tiempo real, es decir, ingreso de set-points, selección de modo automático (A) o manual (M). Para este

tipo de decisiones, y la forma de proceder ante ellas, se detallará cada uno de los procesos necesarios.

2.6.5 Pantallas

Para el desarrollo de las aplicaciones, se realizó lo siguiente:

- Resolución 1024 por 768 pixeles.
- Color de fondo: gris.
- Tipo Replace: permite esconder una pantalla cuando otra se activa

Las pantallas desarrolladas son las siguientes, de acuerdo a la clasificación a la que pertenecen:

Pantallas de Proceso y Monitoreo:

- Vista de Bomba
- Vista de motor de Diesel
- Interlocks
- Datos Modbus
- Horómetros

Pantallas de Comando y Configuración:

- Menú de Inicio
- Configuración de Señal Analógica
- Configuración de Señal Digital
- Arranque/paro de la bomba
- Configuración de válvula PID
- Arranque de Cooler

Pantallas de Supervisión

- Alarmas
- Estado del PLC

Primero se desarrolló la pantalla principal de la aplicación, ver figura 2.13.

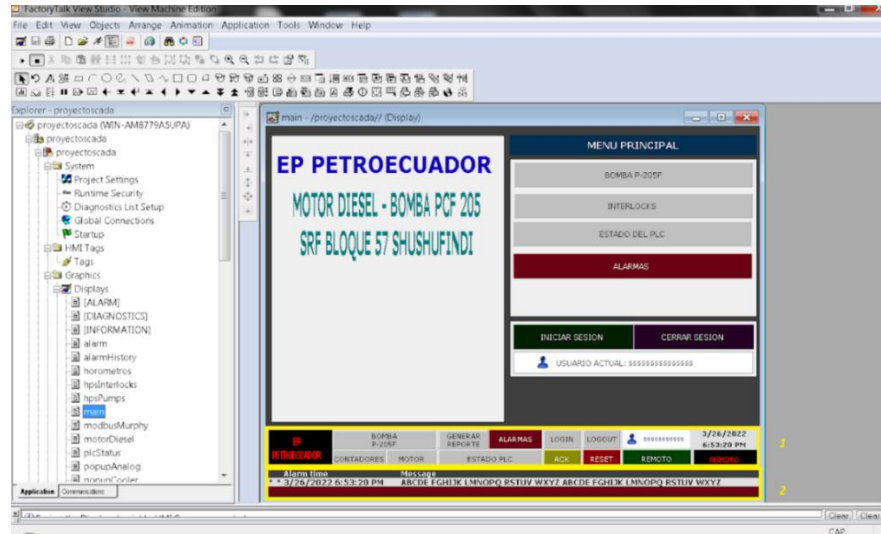


Figura 2.13. Desarrollo de la pantalla principal [Autores]

Se observa la Pantalla Principal de la Aplicación en donde se puede visualizar la distribución más común de elementos. Está compuesta por las secciones:

- a. Configuración del Sistema.
- b. Barra de Estado y Navegación.
- c. Banner de Alarmas.

Configuración del Sistema: se encuentra presente sólo en la pantalla principal del proceso en ella se aprecia el logo del cliente y un botón que se habilitará solo con los usuarios que son administradores, este botón permite ingresar a las configuraciones propias del panel.

Banner de Alamas: Indica las alarmas que se generan en el proceso, mediante una descripción del instrumento donde se generó se encuentra presente en absolutamente todas las pantallas del proceso en la parte inferior. Es el cuadro 2 de la Figura 2.13.

Barra de Estado y Navegación: se encuentra presente en absolutamente todas las pantallas del proceso en la parte inferior, debido a que es una barra informativa y además permite acceder a todas las pantallas desde la posición en la que nos encontremos.

Es el cuadro 1 de la Figura 2.13. Sus elementos son enumerados y detallados en la Figura 2.14, a continuación:

- a. Botones de navegación de pantallas:
- b. Botón de alarmas.
- c. Botón de ingreso de usuario y visualizador
- d. Visualizador de Hora del sistema.
- e. Botón ACK de alarmas.
- f. Botón Reset de alarmas.
- g. Botón y visualizador de local remoto a nivel de Scada.

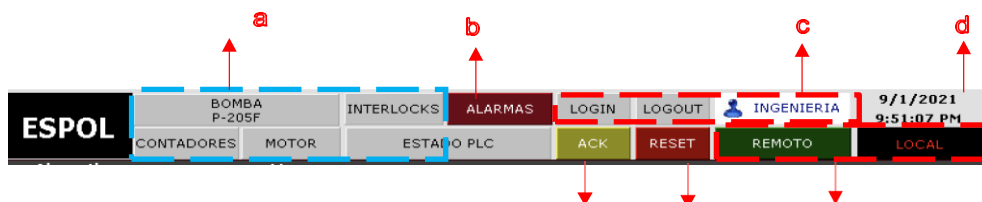


Figura 2.14. Barra de estado y navegación [Autores]

Botones de navegación: permite acceder a las diferentes pantallas que conforman el proceso.

Visualizador de hora del sistema: permite visualizar la hora del sistema.

Indicador de usuario: Permite la visualización del usuario que ha ingresado al sistema, o a iniciado sesión en el sistema. Adicional permite iniciar sesión a un nuevo usuario con nombre y contraseña.

Botón alarmas: Permite ingresar a la pantalla de alarmas

Botón ACK: Permite reconocer las alarmas de manera general de los instrumentos del proceso.

Botón reset: Permite reconocer las alarmas de manera general de los instrumentos del proceso.

Botón pantalla principal: Permite ingresar a la pantalla principal de la aplicación

Pantallas de Supervisión (Alarmas)

La pantalla de Alarmas se despliega al hacer clic en el botón “Alarmas” de Pantalla de Menú Principal o de “Barra de Navegación”. Esta pantalla muestra la ocurrencia de las alarmas del sistema en tiempo real y su estado.

Se muestra la hora a la que ocurrió la falla y el mensaje que corresponde a la descripción del elemento donde se originó la falla para que el operador pueda dar solución.

Se puede restaurar el estado de las alarmas de la máquina, siempre y cuando se haya solucionado la falla que la activó. Para restaurar el estado de las alarmas se debe utilizar el botón Reset que se encuentra en la “Barra de estado” y en la pantalla de alarmas o a través del reconocimiento propio en cada instrumento. Ver Figura 2.15.

En la Figura 2.16, se puede observar el cambio de color el mensaje cuando la alarma es reconocida.

La representación de las alarmas se presenta en cada pantalla en la parte inferior, por un recuadro en color rojo con letras negra o azules cuando ya se ha reconocido. En el instante que se presente cualquier tipo de falla que se presentó en el recuadro anterior, el operador debe dirigirse a la pantalla de ALARMAS para obtener la información detallada y resolver la falla que ocasionó la alarma.

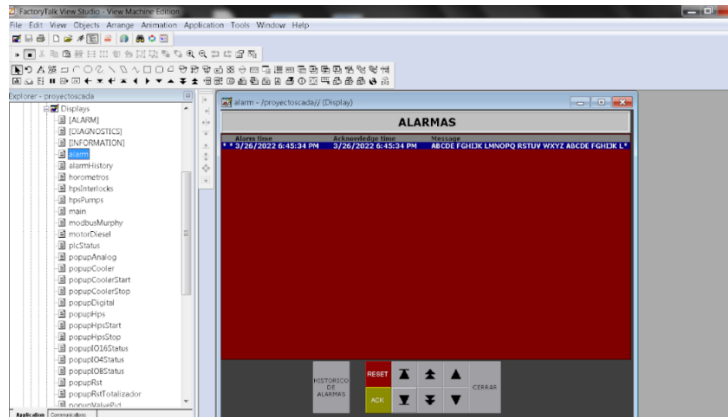


Figura 2.15. Desarrollo de la pantalla de alarmas [Autores]

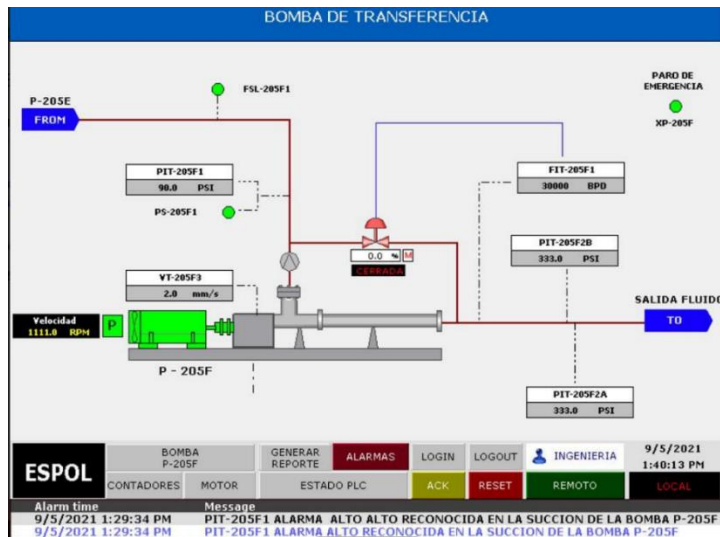


Figura 2.16. Reconocimiento de alarmas [Autores]

Históricos de alarmas

A través de la pantalla alarmas se puede acceder a un histórico de alarmas, ver Figura 2.17, donde tenemos todas las alarmas que se han dado, sean que estén reconocidas o no.

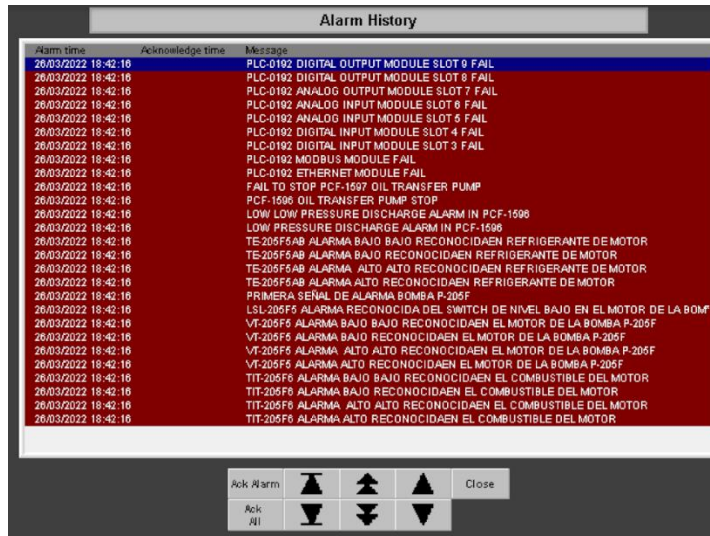





Figura 2.17. Pantalla de Histórico de alarmas [Autores]

Estado del PLC

Esta pantalla se abre al dar clic en el botón “Estado de PLC”, ver Figura 2.18, desde la barra de navegación. Permite verificar el correcto funcionamiento de la fuente y de la conexión Ethernet por medio de los leds indicados.

Los colores en que se presentará los estados son los siguientes:

-  Color Verde: Todo está funcionando sin problemas
-  Color Rojo: Falla de alguna entrada o del módulo
-  Color Gris: No hay conexión

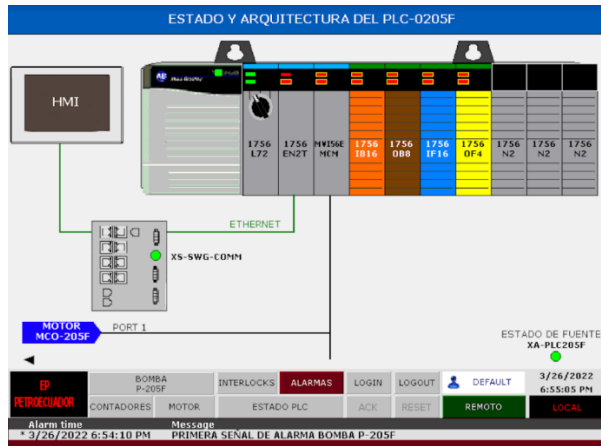


Figura 2.18. Pantalla estado y arquitectura del PLC [Autores]

2.7 Comunicaciones, red Ethernet/IP y Modbus

2.7.1 Red Ethernet

Se utiliza la red Ethernet/IP para tener comunicación entre el PLC y el SCADA, esta red que ofrece servicios de control, configuración y recolección de datos, también para producir y consumir datos entre controladores. Para esto, se utiliza el módulo de comunicación 1756-EN2T y el switch Stratix 8000. Ver Figura 2.19.

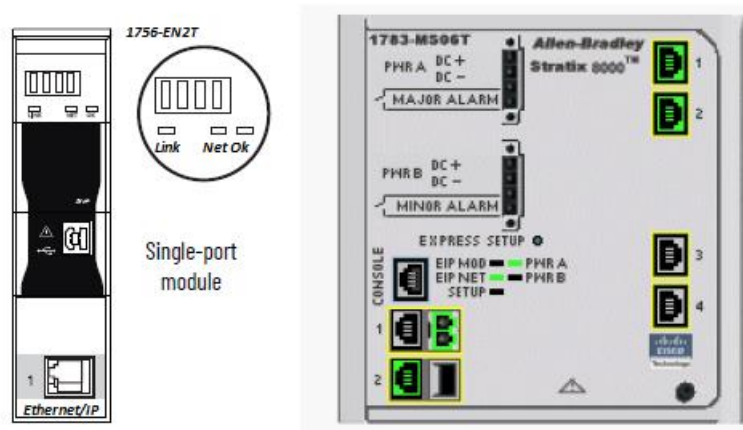


Figura 2.19. Módulo de comunicación 1756-EN2T [M], switch Stratix 8000 [19]

Para instalar el módulo 1756-EN2T hay que realizar lo siguiente: Setear la dirección IP, determinar la ubicación en el chasis e instalarlo, conectar a la red Ethernet/IP por medio del RJ45, descargar el Add-on Profile y el

firmware desde el website en rok.auto/pcdc, finalmente alimentar el chasis y revisar el estado de los leds indicadores, Link, Net y OK.

Las principales características del 1756-EN2T son:

- Voltaje: 5 V; Corriente: 1 A
- Temperatura de operación: $0 \leq T_a \leq 60^\circ\text{C}$
- Temperatura ambiente: 60°C
- Un puerto Ethernet/IP
- Tamaño del cable: conector RJ45 de acuerdo a IEC 60603-7; 2 o 4 pares categoría 5e mínimo de acuerdo a TIA 568-B
- Comunicarse con otros dispositivos Ethernet/IP por medio de mensajes
- Sirve como ruta para compartir datos entre controladores Logix5000

2.7.2 Red Modbus

La red Modbus implementada, sirve para los tres variadores. El módulo MVI56E-MCM, ver Figura 2.20, ubicado en el slot 2 permite la comunicación entre el controlador y los variadores por medio de la red Modbus RTU. Para nuestro proyecto este módulo de comunicación fue configurado como esclavo.

Este módulo realiza la función de que los datos Modbus aparezcan como datos de E/S en el controlador y se configura con el RSLogix 5000, por lo tanto, no se requiere de software adicional.

Posee dos puertos seriales los cuales fueron configurados en forma independiente. Los datos de lectura se envían desde la red Modbus, pasan por el módulo y llegan al controlador, en sentido inverso, si se requiere que el controlador escriba datos, salen de éste, pasan por el módulo y llegan al esclavo Modbus asignado. Se puede indicar que el módulo sirve de puente entre el controlador y los dispositivos Modbus, en este caso, los variadores de velocidad.

Las principales características del módulo son:

- Asignación de memoria de datos definidos por el usuario, hasta 10000 registros de 16 bits.
- Con tecnología RIUP
- Funciones especiales (comandos de control, comandos de eventos, status) son compatibles con transferencia de mensajes mediante la instrucción MSG
- Configurado como esclavo permite al maestro interactuar con los datos generados y se pueden enviar a todos esclavos Modbus de la red.
- Baud rate: 110 baud a 115.2 kbps
- Bits de parada: 1 o 2
- Tamaño de los datos: 7 u 8 bits
- Paridad: par o impar
- Puede funcionar como Modbus RTU o ASCII
- Dirección del nodo: 1 a 247 (configurado por software)
- Consumo: 800 mA a 5 V DC, 3 mA a 24 V DC
- Puerto Ethernet: 10/100 base-T, conector RJ45 para cable Cat 5



Figura 2.20. Módulo de comunicación Modbus MVI56E-MCM [20]

2.7.3 Switch Stratix 5700-8000

En el proyecto se utilizó el switch industrial Stratix 5700-8000, ver Figura 2.21, el cual fue configurado por el departamento de TIC, donde le asignan la dirección IP, la máscara y la dirección Gateway. Lo alimentamos con 24 VDC.

Con respecto al hardware, poseen dos salidas de relé con contactos NA y NC, son conexiones para Alarma, el contacto NA fue aprovechada como entrada al PLC con el tag XS_SWG_COMM y poder detectar falla de alimentación en el SCADA.

Tenemos instalados dos switches según la arquitectura diseñada, entre switches, la conexión es vía fibra óptica. La conexión con el PLC y el HMI se realizó por medio de los conectores RJ45 y el cable UTP categoría 6a. Existe la posibilidad de alimentar con doble fuente, al momento queda alimentado con una.

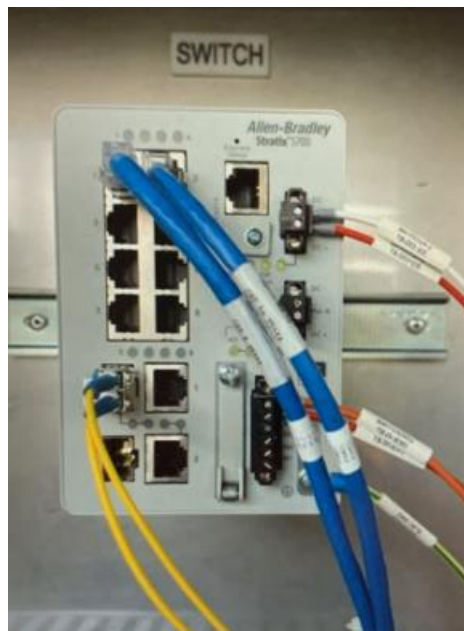


Figura 2.21. Switch industrial Stratix 5700-8000 [Autores]

2.8 Software

2.8.1 RSLogix 5000

La configuración de los módulos E/S se realiza en el software RSLogix 5000. Los datos que se generan en la configuración se transfieren al controlador durante la descarga del programa y luego se transfieren a cada uno de los módulos E/S utilizados.

2.8.2 RSLinx

El software RSLinx Classic, que viene por defecto con Factory Talk, es el utilizado para poder configurar los dispositivos de comunicación, proporcionar diagnósticos y establecer comunicación entre dispositivos.

2.9 Hardware

2.9.1 Motor combustión MC

El motor de combustión entrará a funcionar según requerimientos de producción. El motor de combustión nuevo es de marca Cummins, ver Figura 2.22. Sus principales características según datos de placa son:

- Modelo: QSKTA50-CE
- Potencia: 1675 HP a 1800 RPM



Figura 2.22. Motor combustión Cummins [Autores]

Se trata de un motor robusto de 4 ciclos, de bajas emisiones y respuesta rápida a los cambios de carga. El combustible se inyecta a presiones superiores a 25000 psi, por lo tanto, se utiliza de mejor manera.

2.9.2 Motor eléctrico ME

El proyecto contempla el control de tres motores eléctricos, ver Figura 2.23, el programa de control es el mismo, lo que varía, serán los tags generados para cada sistema al que pertenezca el motor. Cada motor eléctrico entra a funcionar según los requerimientos de control y las horas de uso establecidas.

Los motores son marca Siemens, trifásicos, sus principales características son:

- Tipo: CGII
- Potencia: 800 HP
- Amperaje: 102 A
- Voltaje: 4000 V
- Frame: 508 S
- Frecuencia: 60 Hz
- RPM: 3559



Figura 2.23. Motor eléctrico Siemens [Autores]

Estos motores cuentan con calentadores internos, para evitar la condensación en sus devanados o bobinas, para nuestro caso son de 525 w [21].

2.9.3 Bombas centrífugas multietapas

El sistema de bombeo horizontal HPS, consta de multietapas de tipo centrífugas, cada etapa consta de un impulsor parte móvil y un difusor parte fija, la cual dirige el fluido a la siguiente etapa incrementando su presión. Ver Figura 2.24.

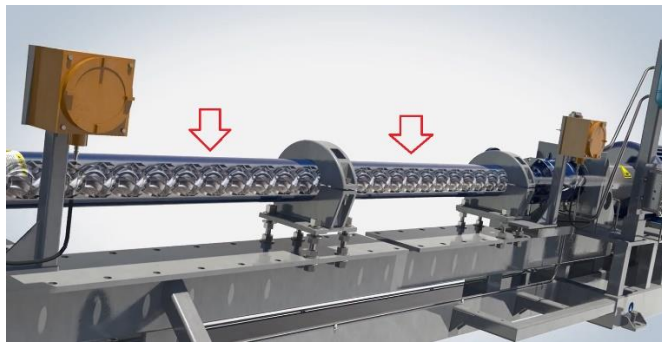


Figura 2.24. Bombas centrífugas multietapas [22]

2.9.4 Cooler

Es un sistema de lubricación que sirve para que la temperatura por fricción del sello mecánico de la cámara de empuje con el eje del motor, no se eleve. Ver Figura 2.25



Figura 2.25. Sistema de lubricación Cooler [Autores]

2.9.5 Variador de velocidad

Para el control de velocidad de cada motor eléctrico, se necesita un variador de velocidad SpeedStar 519 SWD/VSD marca Schlumberger. El método utilizado es el conocido V/Hz para lograr un torque constante. Sus principales características son las siguientes:

- PF: superior al 0,96 a cualquier nivel de carga
- Posee un autotransformador de 18 pulsos a la entrada
- Filtro Sinewave LC a la salida para reducir armónicos

Del sistema eléctrico del bloque, la MT se alimenta al autotransformador, éste alimenta al VSD el cual alimenta al transformador elevador para finalmente alimentar al motor eléctrico. Ver Apéndice B.

En la Figura 2.26 se observa el diagrama de bloques del variador utilizado. La etapa del inversor está compuesta por 6 transistores de potencia IGBT los cuales son activados por pulsos PWM de la tarjeta controladora, para generar la onda cuadrada de salida. La salida PWM simula a la onda senoidal real debido a sus varias capas de switcheo.

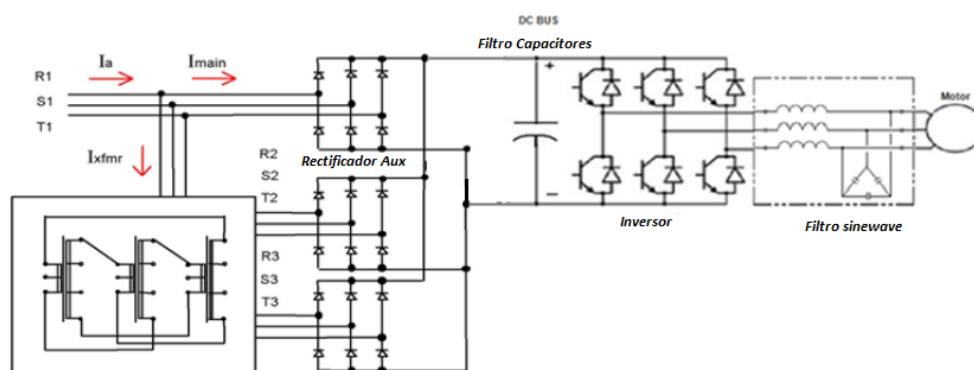


Figura 2.26. Diagrama de bloques del variador [Autores]

2.9.6 Transmisores y sensores de flujo

Los transmisores y sensores de flujo, trabajan en conjunto. El transmisor provee la alimentación que necesita el sensor, dependiendo de la configuración en niveles AC o DC de voltaje, también sirve para realizar la configuración, los sensores son del tipo ultrasónicos [23], ver Figura 2.27.



Figura 2.27. Sensores de flujo y su transmisor [Autores]

2.9.7 Transmisores y sensores de presión

Los sensores van instalados en las tuberías de carga y descarga, son del tipo inteligente, vienen con la característica Modbus RTU (RS-485) y una exactitud del 0,1% [24]. Son construidos en acero inoxidable y a prueba de explosiones. Ver figura 2.28.



Figura 2.28. Sensores y Transmisores de presión [Autores]

2.9.8 Actuador y conversor

De acuerdo a la producción requerida, se genera una salida de PLC análoga de 4-20 mA, la cual ingresa al módulo conversor para activar el actuador el cual funciona con señal neumática. Ver Figura 2.29.



Figura 2.29. Actuador y conversor [Autores]

Lo encerrado en círculo es el conversor, lo demás es el actuador.

2.9.9 PanelView Plus

El PanelView Plus utilizado viene con el FactoryTalk View cargado, por lo tanto, no requiere activación. Posee comunicación Ethernet y un puerto 10/100 BaseT para el conector RJ45. Posee la opción para alimentarlo con voltaje AC (85-264 V) o DC (18-32 V). Ver Figura 2.30.



Figura 2.30. PanelView Plus [25]

3. CAPÍTULO 3

3.1 Resultados y análisis

Para este capítulo, se tiene que considerar abreviaturas que son usadas tanto en el programa de control del PLC como en el diseño del SCADA. Dichas abreviaturas están en el Apéndice C y se rigen a las normas ISA.

3.2 Tags

Los tags son necesarios para leer las variables y estas sean entendidas o visualizadas en un SCADA o PanelView, se crearon 730 tags aproximadamente.

Para cada entrada y salida digital, así como análogas y cualquier tipo de señal que ingrese o salga del PLC, también sirven para la creación de Alarmas. En la Figura 3.1 se muestra una parte de la base de tags creada, que los observamos en la carpeta Controller Tags, que es dónde fueron creadas.

Name	Value	Force Mask	Style	Data Type	Description
# OTP	(...)	(...)	(...)	Area	OIL TRANSFER PUMP
# OTP_C_SRF_1595	(...)	(...)	(...)	Pump	Cooler de Bomba de Transferencia de Crudo PCF
# OTP_C_SRF_1596	(...)	(...)	(...)	Pump	Cooler de Bomba de Transferencia de Crudo PCF
# OTP_C_SRF_1597	(...)	(...)	(...)	Pump	Cooler de Bomba de Transferencia de Crudo PCF
# OTP_ESD	(...)	(...)	(...)	DiscoAlm02a	Parada de Emergencia Bombas de Transferenci
# OTP_PIT_SRF_2011	(...)	(...)	(...)	AnaVal02a	Flujo en línea de Descarga Bomba PCF-1595
# OTP_PIT_SRF_2021	(...)	(...)	(...)	AnaVal02a	Flujo en línea de Descarga Bomba PCF-1596
# OTP_PIT_SRF_2031	(...)	(...)	(...)	AnaVal02a	Flujo en línea de Descarga Bomba PCF-1597
# OTP_FQIT_SRF_2011	(...)	(...)	(...)	Total	Totalizador de Flujo en línea de Descarga Bomb.
# OTP_FQIT_SRF_2021	(...)	(...)	(...)	Total	Totalizador de Flujo en línea de Descarga Bomb.
# OTP_FQIT_SRF_2031	(...)	(...)	(...)	Total	Totalizador de Flujo en línea de Descarga Bomb.
# OTP_LSL_SRF_2011	(...)	(...)	(...)	DiscoAlm02a	Switch Bajo nivel de Aceite Cooler Bomba PCF-1
# OTP_LSL_SRF_2021	(...)	(...)	(...)	DiscoAlm02a	Switch Bajo nivel de Aceite Cooler Bomba PCF-1
# OTP_LSL_SRF_2031	(...)	(...)	(...)	DiscoAlm02a	Switch Bajo nivel de Aceite Cooler Bomba PCF-1
# OTP_PB_SRF_0801	(...)	(...)	(...)	DiscoAlm02a	Parada de Emergencia Local Bomba PCF-1595
# OTP_PB_SRF_0802	(...)	(...)	(...)	DiscoAlm02a	Parada de Emergencia Local Bomba PCF-1596
# OTP_PB_SRF_0803	(...)	(...)	(...)	DiscoAlm02a	Parada de Emergencia Local Bomba PCF-1597
# OTP_PCF_SRF_1595	(...)	(...)	(...)	Pump	Bomba de Transferencia de Crudo PCF-1595
# OTP_PCF_SRF_1596	(...)	(...)	(...)	Pump	Bomba de Transferencia de Crudo PCF-1596
# OTP_PCF_SRF_1597	(...)	(...)	(...)	Pump	Bomba de Transferencia de Crudo PCF-1597
# OTP_PIT_SRF_0802	(...)	(...)	(...)	AnaVal02a	Presión Succión en Bomba PCF-1595
# OTP_PIT_SRF_0803	(...)	(...)	(...)	AnaVal02a	Presión Succión en Bomba PCF-1596
# OTP_PIT_SRF_0804	(...)	(...)	(...)	AnaVal02a	Presión Succión en Bomba PCF-1597
# OTP_PIT_SRF_0805	(...)	(...)	(...)	AnaVal02a	Presión Descarga en Bomba PCF-1595

Figura 3.1. Parte de tags declarados [Autores]

3.3 Árbol generado por los módulos

En el proyecto, el árbol generado por los módulos utilizados, previa configuración, se observa en la Figura 3.2, el número entre corchetes representa el slot. Cada módulo se configura de acuerdo a su número de serie, a la versión del firmware, en nuestro caso es la versión 20 y a la ubicación física que corresponde al slot.

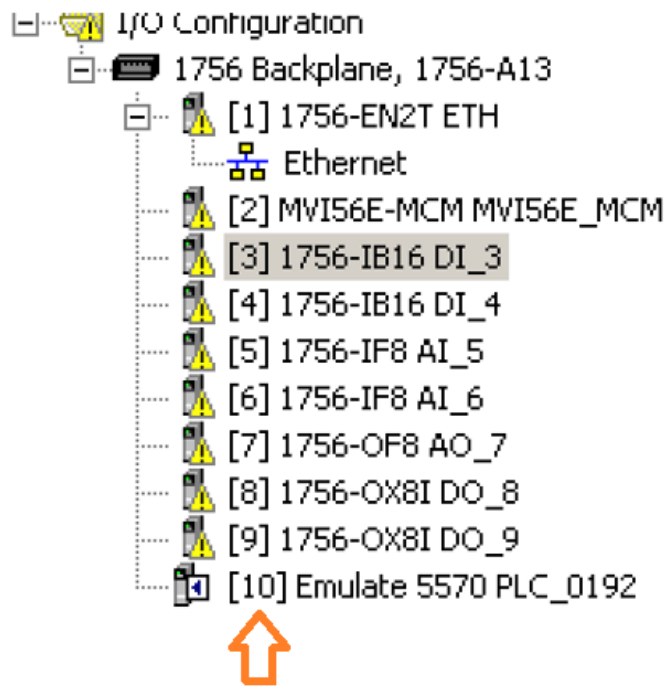


Figura 3.2. Árbol generado por los módulos instalados [Autores]

3.4 Programa

Se utilizó la MainTask para diseñar toda la lógica, luego viene el MainProgram donde se crearon 13 rutinas en lenguaje LD. La organización del MainTask se muestra en la Figura 3.3. En la Tabla 3.1 se indican las rutinas y su función.

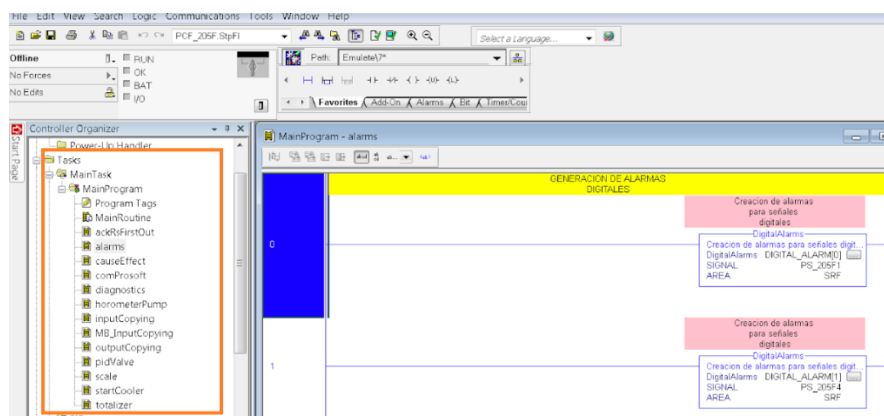


Figura 3.3. MainTask y MainProgram [Autores]

En la Figura 3.4 se muestra el llamado a las diferentes subrutinas, esta rutina es la única que se ejecuta dentro de la carpeta MainProgram, se utiliza el bloque JSR.

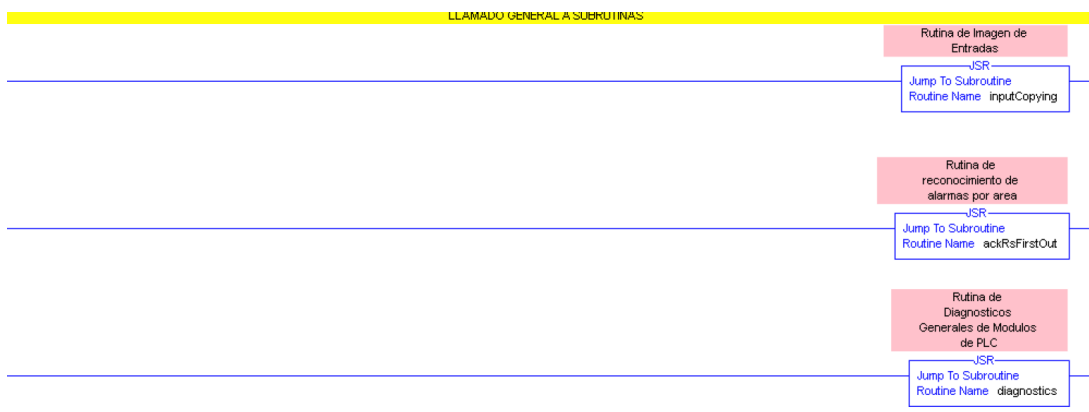


Figura 3.4. Salto a Subrutinas desde MainProgram [Autores]

En la Tabla 3.1 se muestran las rutinas y su descripción.

Tabla 3.1. Rutinas y descripción [Autores]

Tarea	Programa	Rutina	Función
MainTask	MainProgram	MainRoutine	Llamar al resto de rutinas
MainTask	MainProgram	InputCopying	Asignación de canales de todas las tarjetas de entrada y salida
MainTask	MainProgram	OutputCopying	
MainTask	MainProgram	alarms	Configuración de alarmas
MainTask	MainProgram	CauseEffect	Se establece el estado permisivo para arranque de bomba
MainTask	MainProgram	AckRstFirstOut	Rutina para reconocer y resetear alarmas
MainTask	MainProgram	comProsoft	Rutina para comunicación Modbus
MainTask	MainProgram	Diagnostic	Estatus de controlador, tarjetas, fuentes
MainTask	MainProgram	horometerPump	Contabilizador de horas en funcionamiento
Totalizer	FlowTotalizer	MainRoutine	Estará la lógica para los totalizadores, contabiliza bpd
MainTask	MainProgram	pidValve	Control de válvula-actuador con set point deseado
MainTask	MainProgram	scale	Tratamiento de señales analógicas
MainTask	MainProgram	starCooler	Control para arranque del Cooler

La MainTask se configura en tipo continuo, ver Figura 3.5

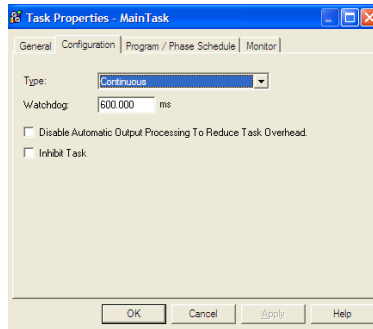


Figura 3.5. Configuración del MainTask [Autores]

3.4.1 E/S digitales y análogas (InputCopying)

Una de las entradas digitales, viene del controlador del MC el cual indicará que el motor está encendido, esta entrada ingresa al módulo 1756-IB16 y la identificamos como VSD1093.RunStatus y activará un tag llamado YI_SRF_2011 que determinará el estado del motor, ver Figura 3.6.

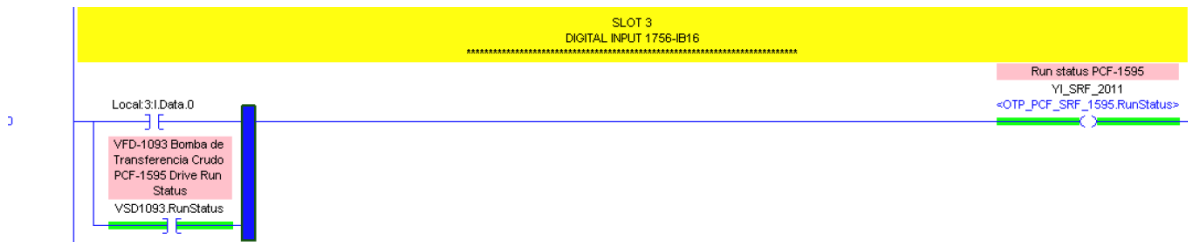


Figura 3.6. Entrada digital que indica MC funcionando [Autores]

Con la programación de este tag, quedó programado e identificado por el SCADA, en cuyas pantallas aparecerá pintado de color verde.

Las entradas análogas para un PLC son señales de corriente de 4 – 20mA, cabe indicar que estas señales hay que realizar un escalamiento para que sea entendible al operador.

Vamos a citar por ejemplo, la presión de succión en nuestra bomba, el instrumento está conectado a una entrada análoga en el canal correspondiente, este nos da valores de acuerdo a la presión. El rango del transmisor utilizado es de 0 – 200 psi, cuando se tenga cero psi, esto

representará 4mA y cuando llegue al valor máximo de 200 psi, se obtendrá 20mA. En la Figura 3.7 se observa la línea de programa donde se lee el canal correspondiente en el registro tipo Source y se lo envía al registro Dest que tiene asignado el tag OTP_PIT_SRF_0802.PV Raw.

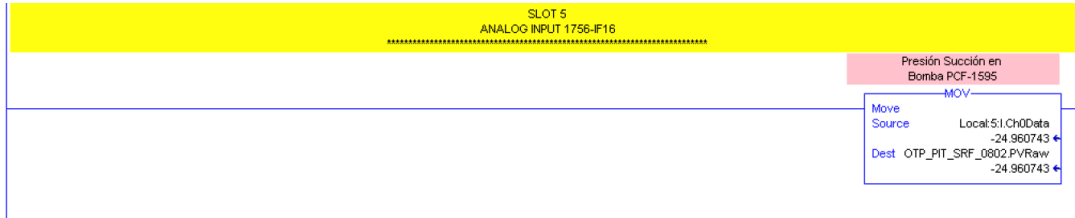


Figura 3.7. Señal de entrada analógica, Presión de succión [Autores]

3.4.2 Salidas digitales y analógicas (outputCopying)

Para las salidas digitales, se utiliza el módulo 1756-OX8I, una de las señales utilizadas, se define para encender el motor, la salida la nombramos como Marcha VSD PCF-1595 con el tag USSR_SRF_2011 que es una señal interna de arranque, queda depositada en el registro Local 8:O.Data.0, la señal Paro VSD PCF-1595 define al tag USSS_SRF_2011, que es otra señal interna de arranque, se asigna a la posición del registro Local 8:O.Data.1. Ver Figura 3.8.

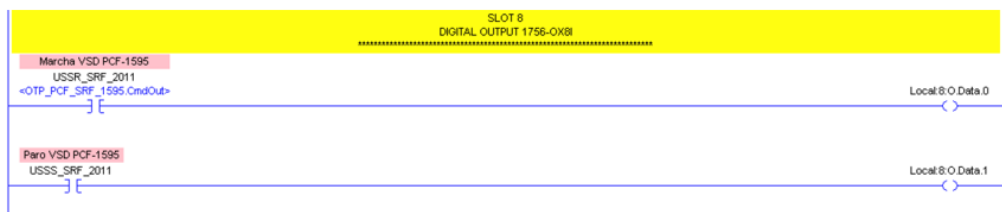


Figura 3.8. Salida digital que indica arranque/paro para el variador VSD PCF 1595 [Autores]

Nuestra única salida analógica es el control del flujo de crudo, donde se aplica un control PID en el programa LD, la entrada son los bpd de producción requeridos, la salida del módulo PID controla a la válvula actuador por medio de una señal de 4-20 mA. En la Figura 3.9 se observa el diagrama de bloques del control aplicado.



Figura 3.9. Diagrama de bloques del control PID [Autores]

Las siguientes señales sirven para controlar la velocidad determinadas como VSD PCF-1596 y 1596 que corresponden a los variadores. Ingresan al bloque LIM el cual sirve para tratar valores MAX y MIIN, donde podemos elegir los límites de velocidad mínimo y máximo, marcados como 30 y 60 Hz. La señal Test marcadas como SX_SRF_2011 nos indican el registro a donde se depositan, el bloque LIM va conectado al bloque MOV, por lo tanto, el registro de LIM se mueve a su destino Dest, que es la salida analógica Local:7:O.Ch0Data y Local:7:O.Ch1Data. Ver Figura 3.10.

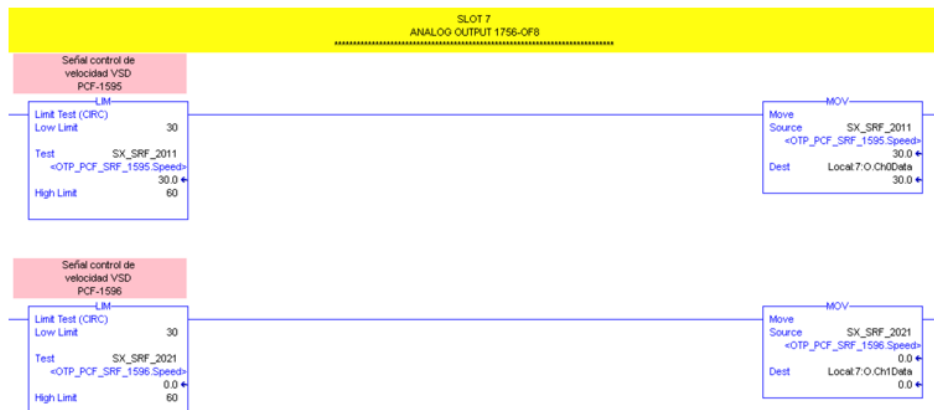


Figura 3.10. Salidas analógicas para control de velocidad de variadores [Autores]

3.4.3 Escalamiento (Scale)

Todas las señales analógicas, deben ser sometidas a este proceso, consiste en aplicar el bloque *analogScale* para que cada señal sea entendible al usuario final. Esto también servirá para las Alarmas, cuando las presiones, vibraciones y flujo, estén encima de los valores normales de operación.

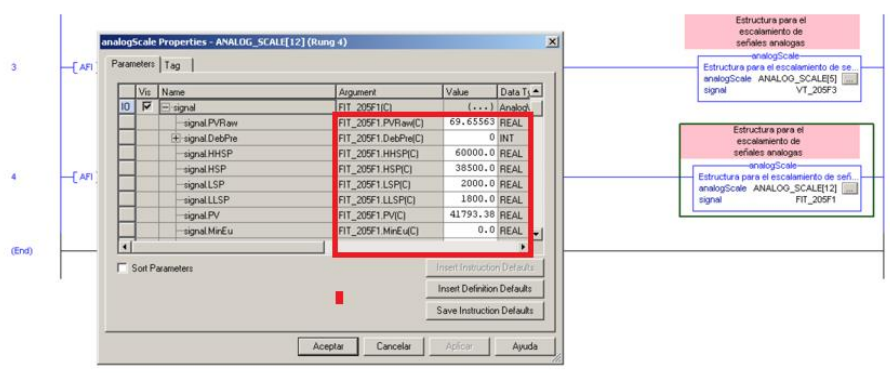


Figura 3.11. Escalamiento de la señal del transmisor de flujo FIT_205F1 [Autores]

En la Figura 3.11 se puede observar que el tag FIT_205F1 es una variable del tipo REAL en donde se configuran los diferentes valores para las alarmas:

- LSP, (LOW SWITCH PRESION) en 2000
- LLSP (LOW LOW SWITCH PRESION) en 1800
- HSP (HIGH SWITCH PRESION) en 38500
- HHSP (HIGH HIGH SWITCH PRESION) en 60000

Estos valores se reflejan en la pantalla correspondiente del SCADA.

3.4.4 Control PID (pidValve)

Para el control PID se ha utilizado el bloque PIDE Enhanced PID. Este bloque recibe el set point del operador SPOper según el requerimiento de producción. Adicional, en este bloque de instrucciones podríamos poner tanto en manual o automático este control de flujo.

Según la Figura 3.12 se determinaron los siguientes valores:

- SPOper en 18000 bpd
- SPHLimit en 60000 bpd (Set point límite alto)
- SPLLimit en 0 (Set point límite bajo)
- CVOper al 100% salida a actuador
- PGain en 4.5 (Ganancia proporcional)
- IGain en 5.0 (Ganancia integral)
- DGain en 0.0 (Ganancia derivativa)

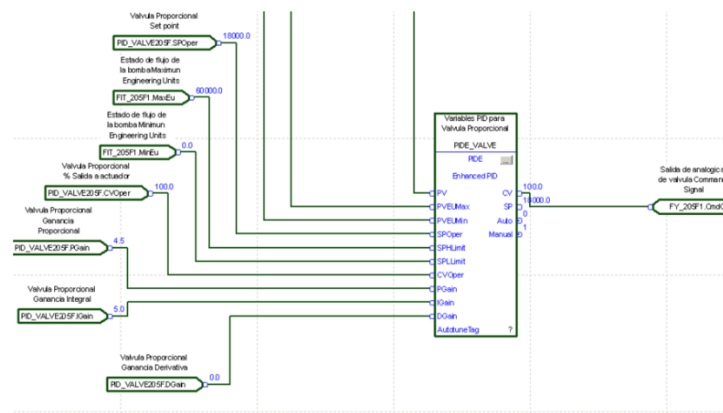


Figura 3.12. Bloque PID en el programa para la señal de salida análoga [Autores]

En la Figura 3.13, se observa el seteo de la producción diaria de crudo, elegida por el operador, del registro Source FY_205F1.spOper, se mueve al registro destino Dest PID_VALVE205F.SPOper

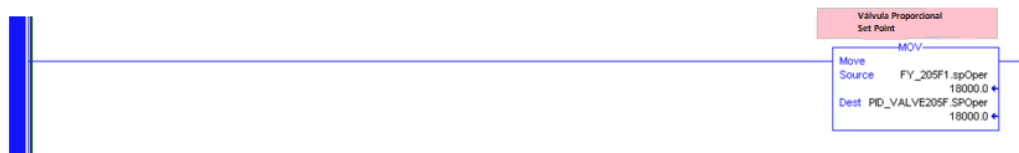


Figura 3.13. Manejo del Set Point, Producción diaria de crudo [Autores]

En la Tabla 3.2 se observan los valores de las ganancias Kp, Ki y Kd obtenidos a partir del método de prueba y error.

Tabla 3.2. Constantes Kp, Ki, Kd [Autores]

Contante	Valor
Kp	4,50
Ki	5,00
Kd	0,00

3.4.5 Estado permisivo (CauseEffect)

En operaciones industriales es necesario precautelar la integridad de las personas y de los activos de la empresa, por ello toda operación debe trabajar en condiciones normales y seguras. Este estado supervisa que todos los instrumentos deben estar en óptimas condiciones, si alguno de ellos presentara fallas, el programa no permitirá el arranque normal de la bomba.

En la Figura 3.14 se observa el programa diseñado, donde se establece una conexión serie con cada uno de los contactos que representan las señales que tienen que cumplirse para poder dar arranque a la bomba.

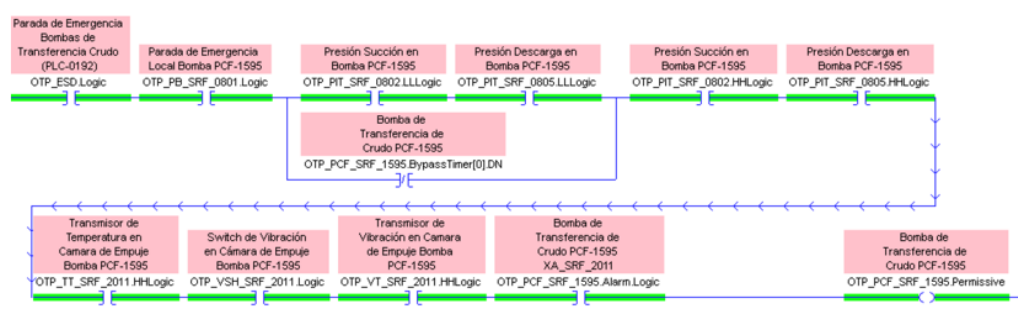


Figura 3.14. Línea de programa donde se establece el estado permisivo [Autores]

Cabe recalcar que se pondrá un temporizador (timer) hasta que los instrumentos tomen su operación de funcionamiento normal.

3.4.6 Totalizador (Totalizer) y Reset por área

Fue necesario crear este bloque de instrucciones para contabilizar la cantidad de bpd, así mismo en el conjunto de instrucciones se podrá resetear los totalizadores. Por medio del bloque Reset del Totalizer se

recepta la señal FIT_205F1 que corresponde a los bpd y se van acumulando en el registro FQIT_205F1.

Por medio de los bloques EQU, la señal de los timer SRF.PLC_Time[3], [4] y [5] correspondiente a las horas, minutos y segundos, se comparan con el valor de los registros HOUR_RESET_FIT, MINUTE_RESET_FIT que corresponde a los valores de horas y minutos seteados, cuando son iguales, ocurre el Reset del totalizador FQIT_205F1.ResetDay. También se generó un Reset por área desde el HMI, donde se resetean alarmas y se deja listo para el arranque del proceso. En la Figura 3.15 se observan las líneas de programa correspondientes.

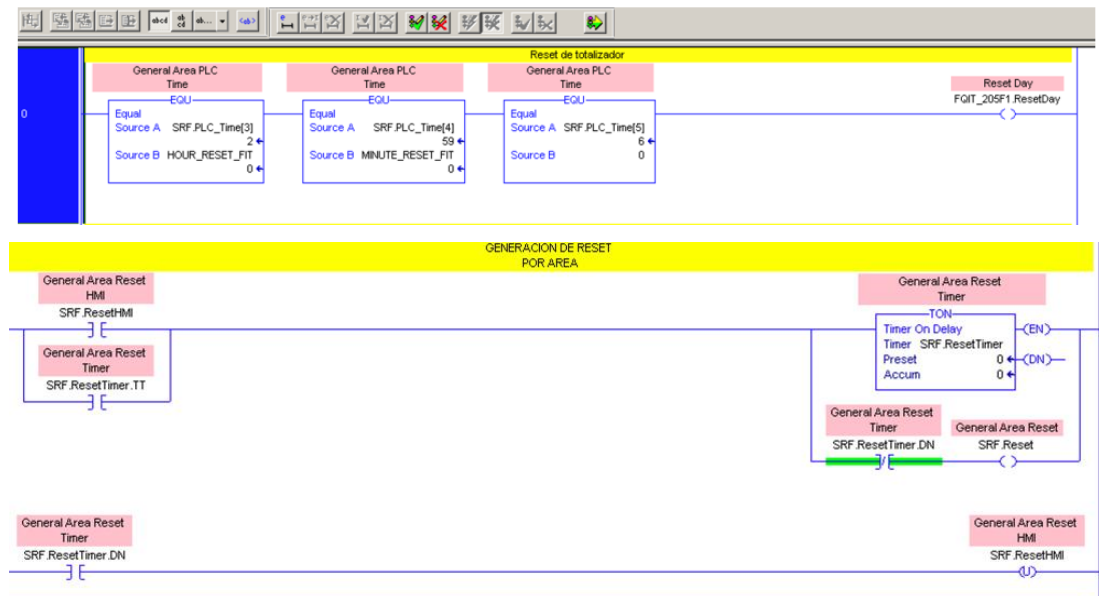


Figura 3.15. Línea de programa con totalizador y Reset por área [Autores]

3.5 Comunicaciones

3.5.1 Ethernet/IP

Para el PLC del MC, se proporcionó la dirección IP 10.18.120.73 y al Panel View ubicado a pie de bomba 10.18.120.74. Estas direcciones IP, se configuran en la tarjeta Ethernet 1756-EN2T. En la Figura 3.16 se observa el número del Slot asignado, en este caso es 1, según ubicación en el

chasis, la dirección IP, el nombre de la red ETH_0 y la descripción. Las IP asignadas fueron dadas por TIC.

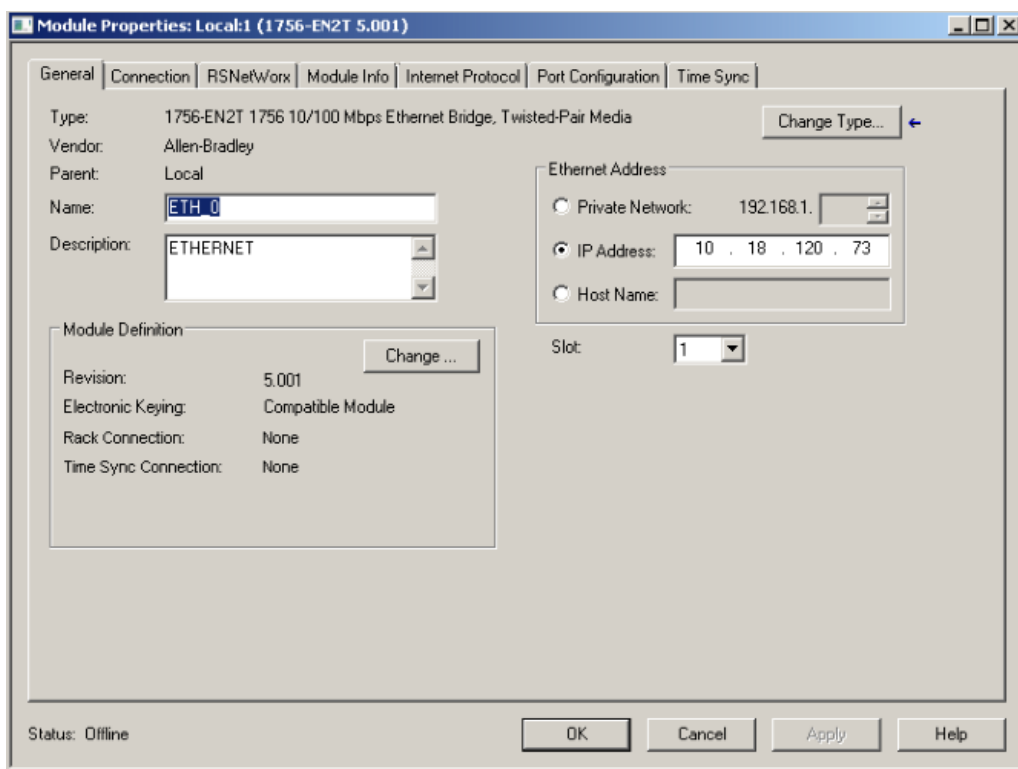


Figura 3.16. Características generales del módulo 1756-EN2T [Autores]

Para el PLC de los ME, se ha proporcionado la dirección IP 10.18.120.70, y para el PanelView dentro del cuarto del operador, la dirección IP 10.18.120.71.

3.5.2 Modbus (comProsoft)

El controlador del MC puede leer señales Modbus, por lo que hará en mapeo y leerá estas direcciones. Una de las señales establecidas en el controlador, fue el número de horas de operación del MC, este dato se establece en un registro y lo leerá. En las direcciones Modbus 30099, se guardaron los registros de las señales indicadas en la Tabla 3.3, una de ellas es el tag para el registro de las horas de trabajo MB_TIME MOTOR, el controlador lee dicho registro y se puede exportar a la base de tags para leerlo en el SCADA o PanelView.

Tabla 3.3. Señales Modbus establecidas [Autores]

ITEM	TAG DE PLC	DESCRIPCION EQUIPO	TAMAÑO	TIPO DE E/S
1	MB_BATTERY_VOLT	VOLTAJE DE LAS BATERIAS TABLERO DEL MOTOR	2	DO
2	MB_CPU_TEMP	TEMPERATURA DEL CPU DEL MOTOR	2	DO
3	MB_OVERSPEED	OVERSPEED DEL MOTOR	2	Integer
4	MB_UNDERSPEED	UNDER SPEDD DEL MOTOR	2	Integer
5	MB_OIL_PRESS	PRESION DE ACEITE DEL MOTOR	2	Integer
6	MB_COOL_TEMP_2	TEMPERATURA DEL REFRIGERANTE DEL MOTOR	2	Integer
7	MB_TIMEMOTOR	HORAS DE TRABAJO DEL MOTOR	2	Integer
8	MB_COMBUSED	COMBUSTIBLE USADO POR EL MOTOR	2	Integer
9	MB_TEMPAIRINT	TEMPERATURA EN ACEITE DE MOTOR	2	Integer
10	MB_PT205F5	PRESION EN LA ENTRADA DE AIRE DEL MOTOR	2	Integer
11	MB_ENGINE_RMP	VELOCIDAD DEL MOTOR	2	Integer

En la Figura 3.17 se observa la lectura de dos datos Modbus, MCM.DATA.ReadData[0].0 y .1, los cuales determinan nivel alto del switch de vibración de la cámara de empuje OTP_VSH_SRF:2011.DI y bajo nivel de aceite Cooler OTP_LSL_SRF_2011.DI

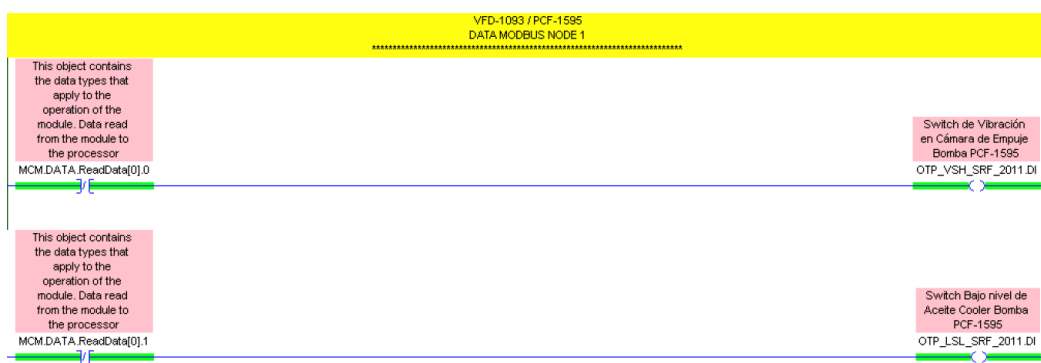


Figura 3.17. Línea de programa para leer datos Modbus: Vibración de cámara de empuje y Bajo nivel de aceite Cooler [Autores]

En la Figura 3.18 se lee el dato Modbus MCM.DATA.ReadData[2] para saber que se dio arranque y se deposita en el registro VSD1093.Start. La

otra línea por medio de los bloques BTD va leyendo los datos MCM.DATA.ReadData[3] y [4] para determinar el tiempo total de funcionamiento de la bomba PCF-1595, se van depositando en el registro VSD1093.TotalRun, en este caso es 16 bits.

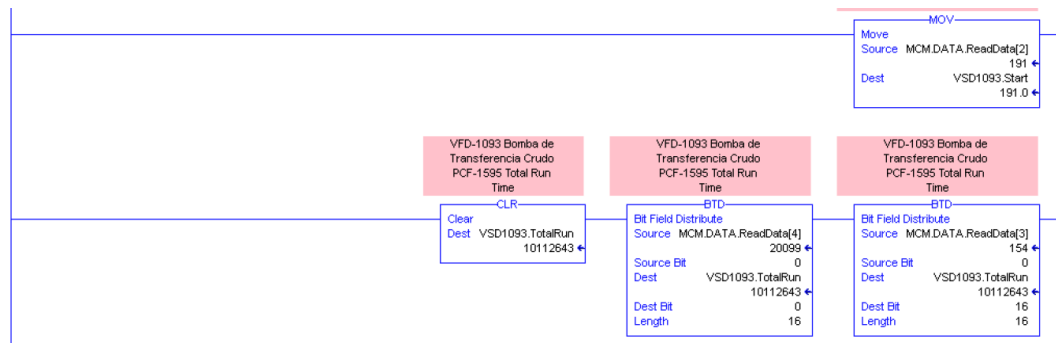


Figura 3.18. Líneas de programa para leer datos Modbus: Start y Total Run [Autores]

En la Figura 3.19 se muestra la configuración del módulo, donde se puede setear su nombre, la descripción y el slot, que en este caso es dos.

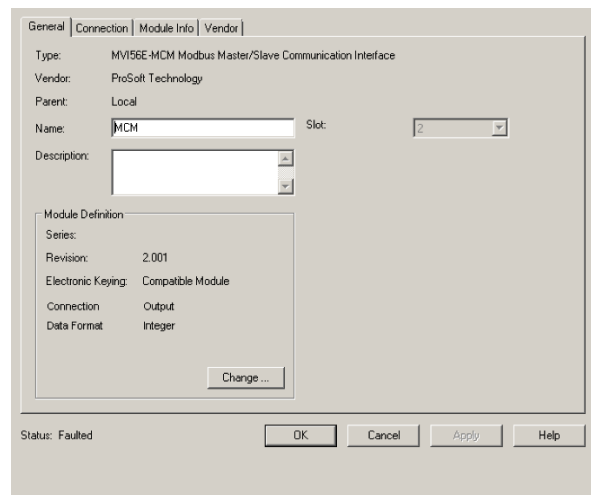


Figura 3.19. Configuración del módulo MVI56E-MCM [Autores]

3.6 Diseño SCADA

Para el diseño de las pantallas se utilizó el estándar ISA S5.1 hasta el S5.5. Se crearon 18 pantallas, desde la inicial con el menú principal hasta la configuración de las señales analógicas de salida. A continuación se detallan las pantallas.

3.6.1 Pantallas Vista de MC y ME

La pantalla que se diseñó para el MC se muestra en la Figura 3.20 donde se observan los diferentes transmisores y switches de presión, flujo y vibración. Se muestra la línea café para crudo y la línea y cuadros azules, para señales eléctricas. Sólo para el MC de combustión se consideró el control PID con su respectivo actuador y convertor.

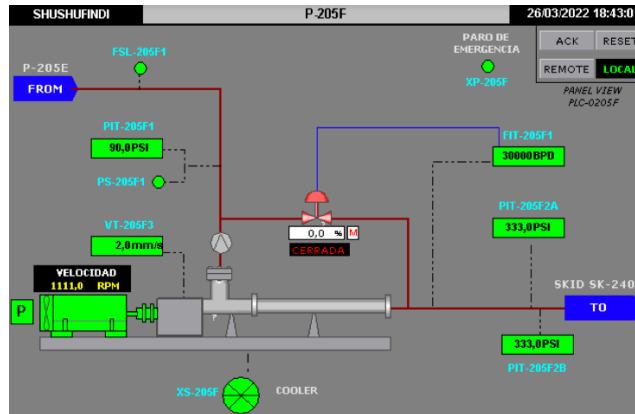


Figura 3.20. Pantalla para el MC [Autores]

La pantalla que se diseñó para los ME se muestra en la Figura 3.21 donde el crudo viene desde LACT, está activo un ME, el segundo está detenido en modo P y M. El tercer ME no está activo, se realizó el diseño, pero no se le ha dado arranque todavía, por este motivo sale la leyenda: Fail to Stop.

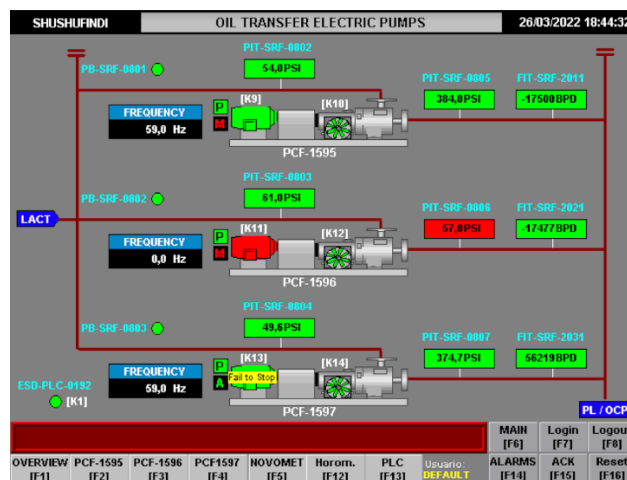


Figura 3.21. Pantalla para los ME [Autores]

3.6.2 Interlocks (Permisivo)

La pantalla que establece el estado P se lo indica en la Figura 3.22 donde se observa en verde, cada uno de las señales que están activas, éstas señales son las mismas de acuerdo la línea de programa de la Figura 3.14 con circuito serie. Las nueve señales deben estar activas para lograr el estado P.

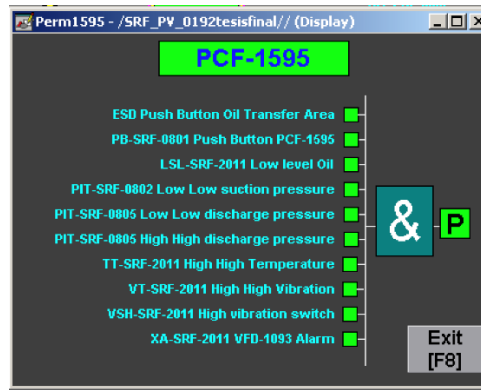


Figura 3.22. Pantalla del estado P [Autores]

3.6.3 Datos Modbus

La pantalla de los datos Modbus se observan en la Figura 3.23 donde se muestran las principales variables de funcionamiento del MC, sólo es visualización.

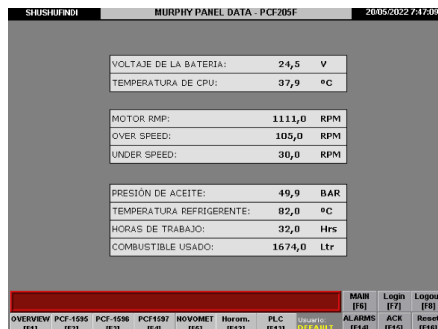


Figura 3.23. Pantalla Modbus con variables del MC [Autores]

3.6.4 Menú de Inicio

La pantalla de inicio terminada se muestra en la Figura 3.24 donde podemos acceder a la pantalla de Bomba, interlocks, estado del PLC y alarmas. En todas las pantallas se muestra un cuadro de alarmas y los respectivos botones de Ack Alarm, Silence Alarms, Clear Alarms y Close.

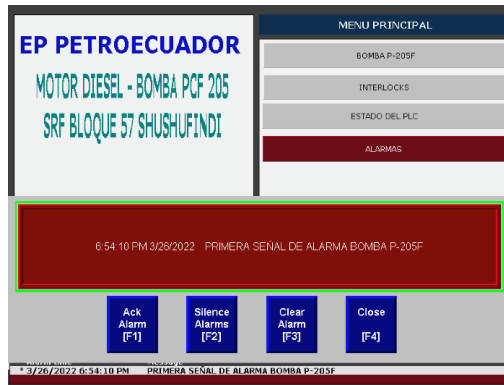


Figura 3.24. Pantalla de inicio Principal [Autores]

3.6.5 Configuración de señal analógica

La pantalla de configuración de señal analógica se muestra en la Figura 3.25 donde previamente se han determinado en el programa los valores que representan HH, H, L y LL con los cuales se activarán las Alarmas. Estos niveles de alarma los setea el operador.

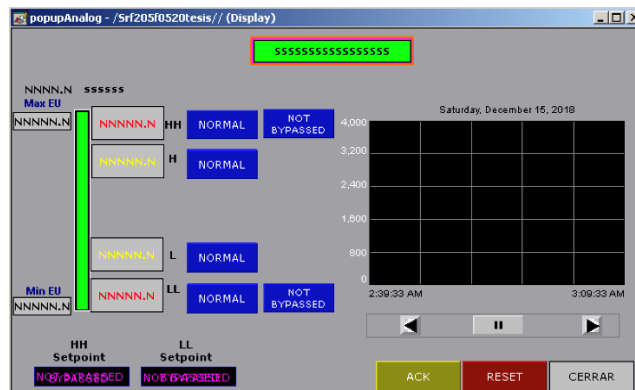


Figura 3.25. Pantalla de configuración señal analógica [Autores]

3.6.6 Arranque/Paro de Bomba

La pantalla para el arranque y paro de la bomba se muestra en la Figura 3.26, también se añadieron los botones ACK para reconocimiento de alarmas y botón de Reset.

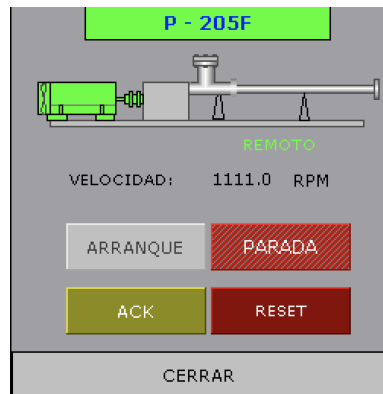


Figura 3.26. Pantalla de Arranque/Paro de Bomba [Autores]

3.6.7 Configuración de la válvula PID

La pantalla para la configuración de la válvula PID se muestra en la Figura 3.27 donde se puede elegir el dato Set Point (SP). Las constantes proporcional e integral (Kp) y (Ki) fueron calculadas de manera manual, por medio del método prueba y error. Se visualiza el porcentaje de apertura de la válvula en 38,3%. La gráfica va mostrando los bpd.

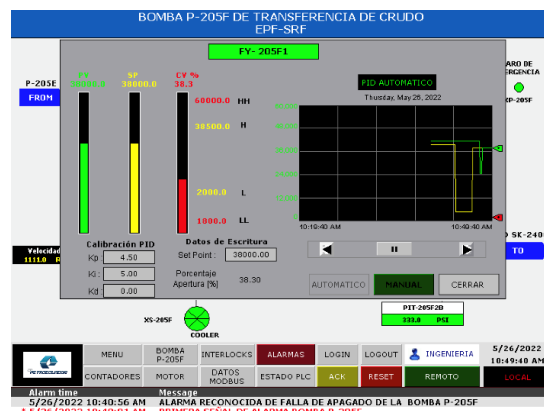


Figura 3.27. Pantalla de Configuración de válvula PID [Autores]

3.6.8 Arranque del Cooler

La pantalla para el arranque del Cooler se muestra en la Figura 3.28 se diseñó la siguiente pantalla, donde se muestran los botones de Arranque y parada.

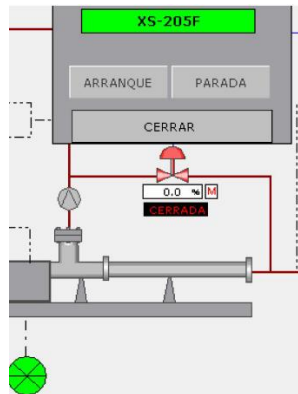


Figura 3.28. Pantalla de arranque de Cooler [Autores]

3.6.9 Pantalla de Bypass

Para el SCADA y el control se ha considerado realizar bypass a ciertas señales de control, las que dan la condición del estado permisivo P. En la figura 3.29 se muestra del lado izquierdo, el caso del switch de presión PS en modo Normal y del lado derecho en modo Bypass.

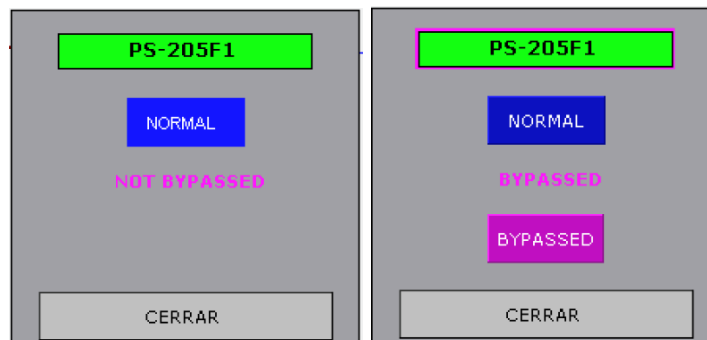


Figura 3.29. Pantalla de switch de presión en modo Normal y Bypass [Autores]

3.7 PRESUPUESTO

En la Tabla 3.4 se muestran los valores referenciales para la implementación de la automatización y del sistema SCADA, no se considera el precio de los transmisores y sensores ni la mano de obra por instalación, programación y puesta en marcha.

Tabla 3.4. Presupuesto referencial para la automatización y SCADA [Autores]

Item	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Total
1	PLC y módulos	2	4500	9000
2	Licencias	1	3000	3000
3	Pantallas HMI	2	3800	7600
4	Switch industrial	2	5000	10000
5	Materiales eléctricos y cables	2	7000	14000
6	Gabinetes en acero inoxidable	2	2000	4000
			Total	47600

4. CAPÍTULO 4

4.1 Conclusiones Y Recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

Luego de realizar este importante trabajo donde se aplican la mayoría de las materias de la maestría, podemos concluir lo siguiente:

- Se logra cumplir con los objetivos planteados, estableciendo un sistema altamente confiable debido a la calidad de los equipos y aplicaciones utilizadas, a la integridad lograda y a la programación de control establecida y debidamente probada.
- Aprovechando el cambio de motores de combustión a motores eléctricos, se diseñó la red Modbus con sus variadores, con la finalidad de poder visualizar en el SCADA parámetros como voltaje, corriente y potencia eléctrica.
- Las características del proyecto son: control semi automático y centralizado, la red establecida es LAN en estrella y una red Ethernet/IP para poder guardar y ver datos en forma remota, desde la ciudad de Quito.
- El gran desafío fue realizar la comunicación entre el PLC, la red Modbus y Ethernet/IP. Para esto, se configuraron los módulos MVI56E-MCM, el 1756-EN2T y los switches Stratix 5700/8000 con el RSLogix 5000. La ayuda de TIC fue fundamental para la asignación de las direcciones IP y como es un tema de seguridad, ellos revisaron y aprobaron las configuraciones elegidas. Con respecto al switch industrial Stratix, fue configurado directamente por TIC con su propio software considerando que son fabricados por Cisco.
- La red Modbus requiere más tiempo en la configuración y mayor cuidado en la programación, en lo que tiene que ver con la asignación de los registros.
- Para la configuración del control PID, se aplicó el método de prueba y error, es decir, se encontró el K_p y el K_i en forma manual, aplicado al actuador neumático y convertidor, sistema aplicado sólo para el control del MC.

- Para el diseño SCADA se aplicaron las normas ISA, tanto para las pantallas como para la designación de los instrumentos. Cada nomenclatura elegida, tiene su razón de ser y es norma en toda la empresa.
- Fue necesario la implementación de un sistema Bypass para las señales digitales, el cual sirve para pasar por alto cualquier acción de control producida por una alarma o para actividades del área de mantenimiento, donde se requiere cambiar algún instrumento y no se puede parar la producción, con esto logramos la flexibilidad.
- Entre las fortalezas del proyecto realizado podemos indicar sobre las facilidades en cuanto a la ejecución e implementación, al ser una empresa pública que maneja un recurso valioso.

4.1.2 Recomendaciones

- Entre las debilidades, la principal sería que no se puede realizar un control completamente automático, siempre se depende de los requerimientos de producción y de la vigilancia del operador. Se podría trabajar en un futuro, en conjunto con los pozos de producción, un sistema automático aplicando Machine Learning o Deep Learning.
- Cada una de las señales de E/S digitales y análogas deben ser protegidas con los fusibles adecuados, para las digitales un fusible de 0,5 A, para las análogas un fusible de 0,1 A.
- Generar un archivo en Excel, para ir escribiendo todos los tags, que sirva de base para la programación del PLC y del FactoryTalk, con esto evitamos errores en la escritura.
- La conexión entre switches se recomienda realizar con fibra óptica debido a la distancia de 330 m. que existe entre ellos.
- Tener cuidado con las versiones asignadas en los PanelView, debe ser la misma que la del FactoryTalk, de lo contrario, se produce una falla de comunicación.

- En las salidas digitales, se deberá conectar un relé de protección, para que el contacto del mismo, maneje la carga, con esto protegemos la salida del PLC. Esto se implementó en el proyecto.
- Respaldo el programa de control del PLC, con esto se estará protegido contra daños del mismo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Secretaría de Hidrocarburos, “Mapa de bloques petroleros del Ecuador continental”, [online]. Disponible en: http://www.secretariahidrocarburos.gob.ec/wp-content/uploads/2015/09/Mapa-Bloques-Petroleros-actualizado-en-la-WEB-25_09_2015.pdf
- [2] Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, “Balance Energético Nacional 2020”, primera edición, agosto 2021 [on line]. Disponible en: Balance Energético Nacional – Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables (recursosyenergia.gob.ec)
- [3] Petroecuador EP, “Informe Estadístico Enero-Diciembre 2021”, [online]. Disponible en: <https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/03/INFORME-ESTADISTICO-ENERO-DICIEMBRE-2021.pdf>
- [4] D. Arroyo, P. Díaz, “Diseño y elaboración de un software que permita determinar la vida económica y útil de los motores de combustión interna a diesel y a gas utilizados en Petroproducción en el Distrito Amazónico”, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, 2005.
- [5] EPA Emission Standards for Heavy-Duty Highway Engines and Vehicles, [Online]. Disponible en: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockkey=P100OA05.pdf>
- [6] S. Jiménez, “Diseño del sistema de automatización y enlace a la red Scada de Petroperú para realizar el control automático de las motobombas de la estación Andoas del oleoducto Nor-Peruano”, Tesis, Facultad de Ciencias, U. Nacional de Piura, Piura, Perú, 2018.
- [7] Y. Ospanov, Z. Moldasheva, T. Toleuov, “Automated systems for main oil pipelines diagnostic and control”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, Rusia, 2021.

- [8] K. Chkara, H Seghioer, "Criteria to implement a supervision system in the petroleum industry: A case study in a terminal storage facility", *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, Vol. 5, No. 2, Emiratos Arabes, 2020
- [9] W. Xibin, L. Guohong, W. Xuejie, "PLC-based SCADA system for oil storage and application," 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering, 2011, pp. 1539-1541, doi: 10.1109/ICEICE.2011.5777205
- [10] O. Rashad, O. Attallah, I. Morsi, "A PLC-SCADA Pipeline for Managing Oil Refineries," 2022 5th International Conference on Computing and Informatics (ICCI), 2022, pp. 216-220, doi: 10.1109/ICCI54321.2022.9756108
- [11] R. Lewis, "¿Se pueden usar los lenguajes gráficos IEC 61131 para aplicaciones de PLC relacionadas con la seguridad?", *IEE La aplicación de IEC 61131 en control industrial (Ref. No. 2002/060)* , 2002, págs. 2/1-2/6 , doi: 10.1049/ic:20020030.
- [12] Schlumberger, "Reda HPS Sistemas de bombeo de superficie horizontal multietapa", [Online], Disponible en: <https://www.slb.com/completions/artificial-lift/reda-hps-pumps>
- [13] H. Jack, "Automating Manufacturing Systems with PLCs", Versión 5.0, Free Software Foundation, 2007, pp. 28.2
- [14] M. Branch y B. Bradley, "Supervisión del sistema basado en la Web en tiempo real" , Registro de la conferencia técnica anual de la industria de la pulpa y el papel de 2006, 2006, págs. 1 a 4, doi: 10.1109/PAPCON.2006.1673780.
- [15] Rockwell Automation, "Installation Instructions 1756 Ethernet/IP Communication Module", Rockwell Automation Publication 1756-IN050D-EN-P, March 2021
- [16] Rockwell Automation, "Manual de Usuario Sistema ControlLogix", Publicación de Rockwell Automation 1756-UM001P-ES-P, Mayo 2017.
- [17] Rockwell Automation, "Manual de usuario Módulos de E/S digitales ControlLogix", Publicación de Rockwell Automation 1756-UM058H-ES-P, Mayo 2015.
- [18] Rockwell Automation, "Technical data 1756 ControlLogix I/O Modules Specifications", Rockwell Automation Publication 1756-TD002n-EN-E, November 2021.
- [19] Rockwell Automation, "Stratix Managed Switches User Manual", Rockwell Automation Publication 1783-UM007P-EN-P, November 2021
- [20] ProSoft Technology, "Datasheet Modbus Master/Slave Communication Module MVI56E-MCM/MCMXT", Enero 2019.
- [21] Siemens, "Induction Motors/Generators Horizontal 500,580,680,800,SH630 and SH710 Frames ODP, WPI, & WPII Enclosures, Types CG, NCG, CGI, CGII, 1RA, 1RP, 1SP Installation, Operatin & Maintance Instructions", Anim-03520-0814 A5E39389476A Rev AD, Febrero, 2020

- [22] Schlumberger, “Sistema de bombeo de superficie multietapa horizontal Reda HPS de Schlumberger”, [Online], Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=IONtAvGSBGs>
- [23] Endress+Hauser, “Proline Prosonic Flow 93 HART”, BA00070D/06/EN/13.11 71134382, Valid as of versión V 2.02.XX,
- [24] SOR Measurement and control, “Pressure Transmitters”, SORInc Registered Quality System to ISO 9001, Form 1806, December 2021
- [25] Rockwell Automation, “PanelView Plus Terminals User Manual”, Rockwell Automation Publication 2711P-UM001K-EN-P, February 2020

APÉNDICES

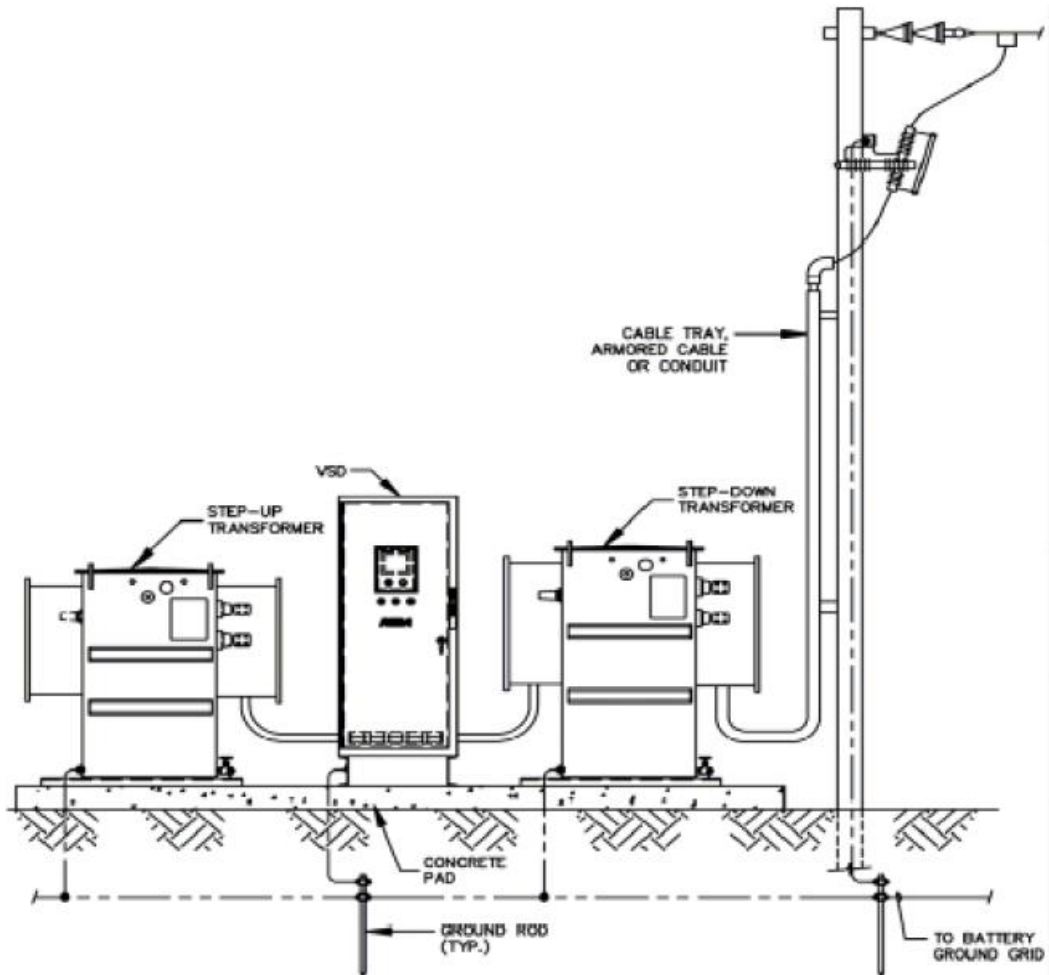
APÉNDICE A

Listado de E/S digitales

CANAL	TAG DE PLC	DESCRIPCION EQUIPO	SERVICIO	TIPO DE E/S	TIPO DE SEÑAL	Módulo
0	PS_205F1	SWITCH DE PRESIÓN	Baja presión en succión de la bomba	DI	Contacto seco	1756-IB16
1	PS_205F4	SWITCH DE PRESIÓN	Baja presión de aceite en Incrementador de Velocidad	DI	Contacto seco	1756-IB16
2	FSL_205F1	SWITCH DE FLUJO	Bajo flujo en succión de la bomba	DI	Contacto seco	1756-IB16
3	TS_205F4	SWITCH DE TEMPERATURA	Alta temperatura de aceite en Incrementador de Velocidad	DI	Contacto seco	1756-IB16
5	XP_205F	PARO DE EMERGENCIA	Paro de emergencia ubicado en el tablero de control PLC 205F	DI	Contacto seco	1756-IB16
6	PB_STOP	PULSADOR STOP	Pulsador de paro de la bomba ubicado en el tablero de control PLC 205F	DI	Contacto seco	1756-IB16
7	PB_START	PULSADOR START	Pulsador de arranque de la bomba ubicado en el tablero de control PLC 205F	DI	Contacto seco	1756-IB16
8	HS_205F	SELECTOR LOCAL O REMOTO	Selector local/remoto de la bomba ubicado en el tablero de control PLC 205F	DI	Contacto seco	1756-IB16
9	XA_PLC205F	ESTADO DE ALIMENTACION PLC	Estado de fuentes ubicado en el tablero de control PLC 205F	DI	Contacto seco	1756-IB16
10	XS_205F	ESTADO DEL COOLER	Estado del Cooler	DI	Contacto seco	1756-IB16
13	YI_MCO205F	ESTADO DEL MOTOR	Estado del motor proviene del tablero local del motor	DI	Contacto seco	1756-IB16
15	XS_SWG_COMM	ESTADO DE SWITCH Stratix 8000	Estado switch ubicado en el tablero de control PLC 205F	DI	Contacto seco	1756-IB16
0	XS_PLC_205F	SEÑAL DE ARRANQUE/PARO DEL MOTOR	Se envía la señal hacia el tablero local del motor	DO	Contacto seco / rele	1756-OB8
1	XA_205FY	LUZ PILOTO AMARILLA	Indicador que el motor se encuentra apagado	DO	Contacto seco / rele	1756-OB8
2	XA_205FG	LUZ PILOTO VERDE	Indicador que el motor se encuentra encendido	DO	Contacto seco / rele	1756-OB8
3	XA1_205F	PERMISIVO DEL PROCESO	Permisivo del proceso enviado hacia el tablero local del motor	DO	Contacto seco / rele	1756-OB8
4	XS_PLC_STOP	PARO DEL MOTOR	Se envía la señal hacia el tablero local del motor	DO	Contacto seco / rele	1756-OB8
5	XS_205FSTART	ENCENDIDO DE COOLER	Señal de encendido del cooler, se lo realiza a través de un contactor	DO	Contacto seco / rele	1756-OB8
6	XS_RMPUP	SUBIR VELOCIDAD DEL MOTOR	Se envía la señal hacia el tablero local del motor	DO	Contacto seco / rele	1756-OB8
7	XS_RMODOWN	BAJAR VELOCIDAD DEL MOTOR	Se envía la señal hacia el tablero local del motor	DO	Contacto seco / rele	1756-OB8

APÉNDICE B

Plano general de instalación del variador



APÉNDICE C

Tabla para Abreviaturas en Programa para control y SCADA

ABREVIACION	DESCRIPCION
VSD	VARIADORES DE VELOCIDAD
PL	LANZADOR
OTP	BOMBAS DE TRANSFERENCIA DE CRUDO
ESD	SHUTDOWN DE EMERGENCIA
PIT	TRANSMISOR DE PRESION
PT	TRANSMISOR DE PRESION
TE	TEMPERATURA
PS	SWITCH PRESION
TS	SWITCH TEMPERATURA
YI	ESTADO DEL MOTOR
USSR	MARCAS PARA MARCHA
USSS	MARCAS PARA MARCHA
VSD PCF	VARIADOR BOMBA
OTP ESD	PARADA DE EMERGENCIA
LL	BAJO BAJO
HH	ALTO ALTO
TT	TRANSMISOR DE TEMPERATURA
VSH	SWITCH DE VIBRACION ALTO
VT	TRANSMISOR DE VIBRACION
XA_SRF	ARRANQUE DE LA BOMBA
LACT	UNIDAD DE FISCALIZACION DE CRUDO
LSL	SWITCH NIVEL BAJO
ESD-PLC	Shut Down PLC
PL/OCP	LANZADOR/OCP
P	Estado permisivo
FSL	BAJO SWITCH FLUJO
PV	VALOR DEL PROCESO
CV	VALOR DE CONTROL
SP	SET POINT